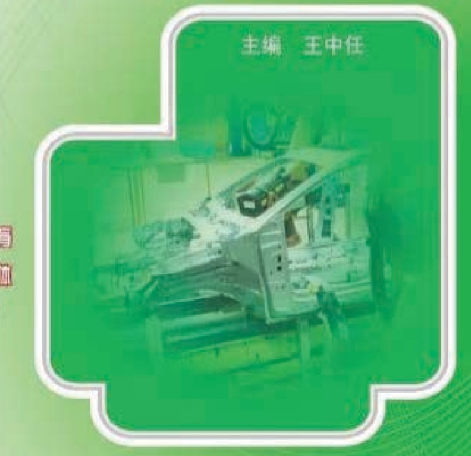


全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材



制造之用

主编　王中任



适用于本科院校工程专业通识教育

集实用性、前沿性和适应性于一体

案例丰富、语言生动、可读性强





全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材

制 造 之 用
The Uses of Manufacturing

主　编　王中任

参　编　宗振华　刘海生

北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是在通识教育课程《制造之用》自编教材基础上重写而成，其根本目的是为了提升非机械类专业学生的制造技术方面的科技文化素养。

全书以汽车及其零部件制造为主要线索，全面地介绍了各种工程材料的制造工艺，包括塑料材料及其加工成型、橡胶材料及其加工成型、玻璃及其加工工艺、陶瓷及加工成型、金属材料与热处理、锻造成形、铸造成形、板料冲压成形、挤压与拉拔、焊接工艺、粉末冶金新工艺、金属切削加工，除此之外，还介绍了数控技术、特种加工、3D打印技术、现代制造装备与自动化等先进制造技术，最后一章以汽车制造工艺进行总结，形成一个整体。本书的内容不包括食品加工、木材加工等内容。

本书可以作为本科院校非机械类专业通识教育选修课教材，也可以作为青少年科普教材。

图书在版编目(CIP)数据

制造之用/王中任主编. —北京：北京大学出版社，2013.12
(全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材)
ISBN 978-7-301-23527-0

Ⅰ.①制… Ⅱ.①王… Ⅲ.①机械制造工艺—高等学校—教材 Ⅳ.①TH16

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第288002号

书　　名：制造之用
著作责任者：王中任 主编
策 划 编 辑：童君鑫 宋亚玲
责 任 编 辑：宋亚玲
标 准 书 号：ISBN 978-7-301-23527-0/TH·0376
出 版 发 行：北京大学出版社
地　　址：北京市海淀区成府路205号 100871
网　　址：http://www.pup.cn 新浪官方微博：@北京大学出版社
电 子 信 箱：pup_6@163.com
电　　话：邮购部62752015 发行部62750672 编辑部62750667 出版部62754962
印 刷 者：
经 销 者：新华书店
787毫米×1092毫米 16开本 12.5印张 288千字
2013年12月第1版 2013年12月第1次印刷
定　　价：30.00元

前　　言

“知人者明，自知者智”，应用型本科院校的工科专业通识教育选修课程的建设与改革，需要在实用性、通俗性和适应性方面下工夫，激发学生的学习兴趣，降低非工科学生的学习难度，提升学生的就业竞争力和长远发展力。

制造，每天都在影响和改变着我们的生活。多亏了制造，才让我们的生活如此多彩缤纷，才能让人们“上天揽月，潜水捉鳖”。

在你日常生活中，你是否曾经想过这些问题：圆珠笔的圆珠、缝衣针如此小而精致，是怎么制造出来的？当你为装修房子购买塑胶水管和龙头的时候，对PPR、PVC这些代号以及质量鉴别是不是一头雾水？汽车是如何制造出来的？3D打印技术为什么会那么热门？读完本书，你应该能回答这些问题。

为什么中国人都要懂一点儿制造？中国已经是世界制造大国，中国制造的文化普及却很迫切。无论你学的是什么专业，现在或者将来在什么岗位工作，你都有必要懂一点制造。随着全球化的逐渐推进，在经济相互依存日渐加强的世界各地，生活中如果没有了“中国制造”已经无法想象。

美好的生活，需要制造，更靠创造。不管你从事什么专业，都可以为“中国制造”快速跨越到“中国创造”贡献你的聪明才智。期望非机械类专业本科生都能懂一点儿制造，这正是编者的愿望，也是本书出版的初衷。因此，本书可以作为高校本科非机械类通识教育选修课教材，也可以作为青少年科普教材。

全书共分18章，内容包括：绪论，塑料材料及其加工成型，橡胶材料及其加工成型，玻璃及其加工工艺，陶瓷及加工成型，金属材料与热处理，锻造成形，铸造成形，板料冲压成形，挤压与拉拔，焊接工艺，粉末冶金新工艺，金属切削加工，数控技术，特种加工，3D打印技术，现代制造装备与自动化，汽车制造。全书以汽车及其零部件制造为线索，绪论以汽车制造概述开始，最后一章以汽车制造工艺进行总结，形成一个整体。本书的内容不包括食品加工、木材加工等内容。

本书由湖北文理学院王中任担任主编，参加编写的还有宗振华和刘海生两位教师，以及彭畅、万仁全、秦凯歌、魏人杰、李彬、郑勇、张学飞、方俊、张明等同学，中航工业航宇公司的宋吉山高工对本书提出了许多宝贵的意见，在此向他们表示衷心的感谢。

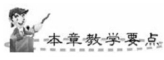
由于自身知识和水平所限，书中难免有疏漏之处，敬请广大学者、专家、读者斧正，交流邮箱 xfu _ wangzhongren@126.com。

王中任

2013年8月于襄阳

目　　录

第1章 导论



知识要点	掌握程度	相关知识
机械的构成	了解以汽车为例的常用机械的组成部分和材料； 熟悉常用材料的加工工艺	汽车使用的材料种类； 汽车各种材料的加工方法
机械加工方法的种类	掌握铸造、锻造、冲压、焊接、切削加工的概念； 了解各种加工方法的特点和应用	铸造、锻造、冲压、焊接、切削加工的概念； 各种加工方法的特点和应用
机械制造流程	了解机械制造的一般流程； 了解汽车制造的流程	机械制造的一般流程； 汽车制造的流程
制造业前景	了解世界制造业的发展趋势； 了解中国制造的地位和前景	2008年金融危机以来的世界制造业格局； 中国从“制造大国”到“制造强国”之路

制造的英文单词 Manufacture，来自拉丁文“manu”，意思是 by hand，朗文词典的解释为“to make or produce by machinery，esp. in large quantities”(用机器来进行做或生产，特别是大量的)。

关于制造的定义，有多种不同的角度，有广义的，也有狭义的。从狭义上说，制造是指把原材料加工成适用的机电产品。从广义来说，国际生产工程学会(CIRP)于 1990 年给出了制造的定义：制造是涉及制造工业中产品设计、物料选择、生产计划、生产过程、质量保证、经营管理、市场销售和服务的一系列相关活动和工作的总称。

制造是人类所有经济活动的基石，是人类历史发展和文明进步的动力。没有制造，就没有人们今天的美好生活。

要制造产品，就不可避免地要使用机械，甚至连产品对象也常常是机械。什么是机械？机械是如何制造出来的？制造有哪些方法？下面以汽车的制造为例来进行简单介绍。

1.1 机械的构成

以最常见的机械——汽车为例来加以说明。一辆汽车是由车身、发动机、驱动装置和车轮等部分组成。制造汽车使用了多种材料，从现阶段汽车零件的重量构成比例来看，钢铁占 75%～80%，有色金属占 5%，非金属材料占 10%～20%。

钢铁材料有钢板、钢材和铸铁。钢板大多采用冲压成形，用于制造汽车的车身和大梁；钢材包括圆钢和各种型钢，用圆钢作坯料，采用锻造、热处理、切削加工等方法来制造曲轴、齿轮和弹簧等零件；铸铁常用来铸造气缸、箱体和汽车零器件等。

钢铁的强度较高、价格低廉，因此使用较多。使用场合不同，对其性能要求也不同。例如，制造汽车的车身时，需使钢铁作较大的弯曲变形，因此应采用易变形的钢板，且要求表面美观便于销售。相反，车架则要求钢板厚且强度高，价格低廉，因此应采用表面不太美观的较厚的钢板。

有色金属材料中铝合金应用最广，用作发动机的活塞、变速箱壳体和皮带轮等。铝合金由于重量轻、美观，大量用于制造汽车零件。锌合金用作装饰品和车门手柄。

非金属材料有工程塑料、橡胶、陶瓷、石棉、玻璃和纤维等。由于工程塑料具有比重小、易成形、着色性好、不生锈等性能，用作汽车中的仪表盘、保险杠、车身内饰等。

图 1.1 给出了轿车各部分的名称、所用材料和加工方法。例如，图上标注的车门(钢板、冲压)表示该部分的名称为车门，所用材料是钢板，采用冲压方法制成。从图中可知，汽车的零件是用多种材料制成的，采用的加工方法有铸造、锻造、冲压和注塑成形等。另外还有一些加工方法图中未标注出来，如机械零件的精加工(切削、磨削)、焊接(用于板料的连接，棒料的连接)等。

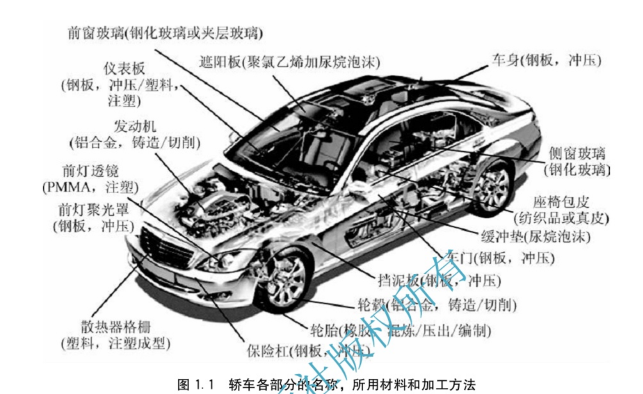


图 1.1 轿车各部分的名称，所用材料和加工方法

1.2 机械加工方法的种类

从汽车的组成来看，制造汽车需要用到多种加工方法。

铸造是将熔融金属注入具有与零件形状相适应的铸型型腔中，待其冷却凝固后获得毛坯或零件的成形方法。用铸造方法得到一定形状与性能的金属件成为铸件。为了制造铸型，先要制造与零件形状相似的模型，在模型周围充填型砂，取出模型后即制成具有一定空腔的砂型，这一砂型称为铸型。铸造生产的优点是适应性强(可制造各种合金类别、形状和尺寸的铸件)，成本低廉。其缺点是生产工序多，铸件质量难以控制，铸件力学性能较差，工人劳动强度大。铸造主要用于制造受冲击力小、形状复杂的毛坯，如：机床车身、发动机汽缸体、各种支架、箱体等。

锻造是指在加压设备及工具的作用下，使坯料、铸锭产生局部或全部的塑性变形，以获得一定的几何尺寸、形状和质量的锻件的加工方法。锻造分为模锻和自由锻。模锻是把加热的坯料置入锻模型腔中受压变形以获得锻件的方法。自由锻是将坯料置于上下砧铁之间加压使之变形以获得锻件的加工方法。锻件数量多时用模锻，数量少时用自由锻。

冲压是利用压力机和冲模对材料施加压力，使其分离或产生塑性变形，以获得一定形状和尺寸的制品的加工方法。通常，该加工方法在常温下进行，主要用于金属板料成形加工。冲压在较大批量生产条件下，虽然设备和模具资金投入大，生产要求高，但具有生产效率高，制品的再现性好且质量稳定，材料利用率高，可生产其他加工方法难以实现的复杂零件，可实现少切削或无切削加工等优点，因此，冲压生产在

汽车、计算机、家用电器、电机、仪器仪表、电子和国防工业等领域均得到广泛的应用。

焊接是通过加热或加压(或两者并用)、并且用或不用填充材料，使焊件形成原子间结合的一种连接方法。焊接实现的是不可拆卸的永久性连接，采用焊接方法制造金属结构，可以节省材料，简化制造工艺，缩短生产周期，且连接具有良好的使用性能。焊接用于船舶、桥梁、车辆及其他机械制造领域。

切削与磨削加工是用切削刀具进行切削或砂轮进行磨削，从而使工件达到规定精度和表面质量的机械加工方法。通常采用各种机床进行切削加工，如车床加工回转表面，钻床、镗床加工孔，龙门刨床加工较大的平面，铣床加工沟槽、平面等。用磨床进行磨削，如用砂轮加工内外回转表面、平面等。

1.3　机械制造流程

制造机械时需要设计图，由设计师设计出能满足性能要求的机械。不同的机械有不同的性能要求，对于汽车则必须满足动力性能、控制性能、操纵性能与安全性能，以及舒适、燃料消耗率低、噪声小等要求。

在设计时先进行总体设计，然后再进行零部件设计，画出装配图和零件图。根据零件图制造出零件，然后进行装配。通常不能根据设计图直接进行加工，而应根据设计图绘制出制造图，再按制造图进行加工。设计图绘出的是加工完成状态的零件图，而制造图则是在制造过程中某一工序完成时工件的状态，两者是有差异的。因此在加工时需要根据制造图准备合适的坯料，并进行预定的加工。

设计人员在设计零件时，应根据机械的使用场合、工作条件等选择零件的材料，决定加工方法。例如，在高温氧化气体中工作的受力零件，应选耐热性高的特殊钢，如果零件的形状复杂，则应选择铸造。在设计时不仅要重视零件的强度，还应考虑使用条件，综合决定零件的材料和加工方法，这是非常重要的。

机械制造方法有铸造、锻造、冲压、焊接、切削、磨削等方法。根据零件的不同，用其中的一种或几种方法来进行制造，之后再进行部件装配和总装配。装配时手工作业不少，在大量生产中也进行自动装配，但自动装配对设备的技术水平要求较高。

机械制造过程中和制造完成以后均要进行检验，从而保证机械的性能，确保其安全性，图 1.2 为汽车制造流程示意图。

汽车是一个比较典型的机械(或机电)产品，汽车制造是现代制造的缩影。本章只是通过汽车制造的例子，给大家建立制造的基本概念。从第 2 至 17 章，分章介绍汽车上用到的各种材料及其制造工艺，最后，在第 18 章，我们又将回到汽车制造，从微观上升到宏观，实现对“制造之用”认识的升华。

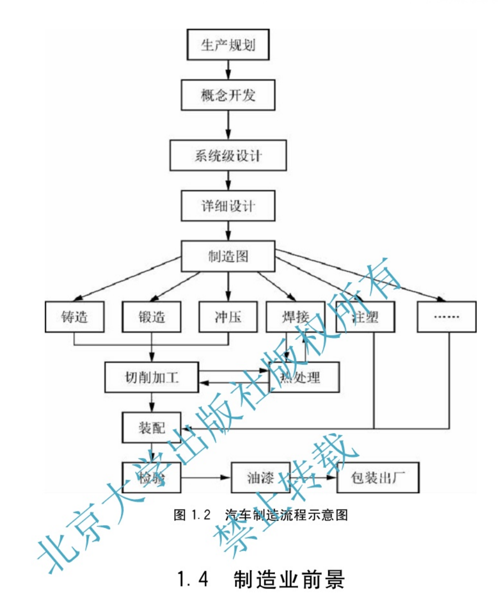


图 1.2 汽车制造流程示意图

1.4 制造业前景

2008 年国际金融危机以来，世界经济竞争格局发生了深刻变化，实体经济的战略意义再次凸显，新一轮科技革命蓄势待发，全球进入创新密集和产业振兴的新时期。

一方面，世界主要发达国家重新重视实体经济，纷纷实施再工业化战略。美国 2009 年制定《重振美国制造业框架》，通过了《制造业促进法案》，2011 年启动“先进制造业伙伴计划”，发布振兴制造业五年出口倍增计划，2012 年 2 月，又制定了《美国先进制造业国家战略计划》，提出要重新认识先进制造业在国民经济体系中的地位，保持在先进制造业领域的国际领先和主导地位。德国、英国、日本等国家都推出一系列重振制造业的重大举措，力图在知识技术密集的高端制造业重塑竞争优势。另一方面，西方发达国家振兴制造业走的是一条新路子，他们依靠科技创新，抢占国际产业竞争制高点、增强经济发展核心竞争力、谋求未来发展的主动权。

近年来，美国学者们发表了一批文章，他们强调新的工业革命即将到来，其核心技术是“制造业数字化”，他们认为美国在信息化方面具有巨大的优势，应该通过大力发展和广泛应用以数字化和智能化为核心的先进制造技术，实现制造业的革命性变化，重新获得在世界制造业的优势地位。

经过60多年的建设，特别是改革开放30多年的奋斗，中国制造业实现了历史性的跨越式发展，制造业生产总值已成为世界第一，我们国家已经成为“制造大国”。但是，我们还不是“制造强国”，其中最主要的差距是自主创新能力还不强，在技术方面一直处在跟踪和追赶状态，特别是许多关键核心技术还远远没有掌握，制造业综合竞争力还很弱。

2012年7月6日召开的全国科技创新大会上，温家宝强调：我国是制造业大国，已经具备很强的制造能力，但仍然不是制造业强国，总体上还处于国际分工和产业链的中低端，如果能在“中国制造”前面再加上“中国设计”、“中国创造”，我国的经济和产业格局就会发生根本性变化。

中国面临着前所未有的挑战，同时也面临着前所未有的机遇。今后20年是我国制造业实现由大到强、在创新方面实现与西方发达国家并行甚至超越的绝佳机遇期。事实上，中国制造业的跨越式发展具备了许多良好的条件：

（1）我国制造业有着世界上最为完整的体系，具备强大的产业基础；

（2）我国制造业拥有巨大的内需市场，需求是最强大的发展动力；

（3）我国一直坚持信息化与工业化融合发展，在制造业数字化方面掌握了核心关键技术，具有强大的技术基础；

（4）我国在制造工业人才队伍建设方面已经形成独特的人力资源优势；

（5）我国制造业在自主创新方面已取得辉煌成就，“上天”、“入地”、“下海”、发电、高铁、国防“杀手锏”等等，显示出巨大的创新潜力。

总之，我们要推动制造业发展走上创新驱动的轨道，在今后20年，实现我国从“制造大国”到“制造强国”的跨越式发展。

同学们，不管你现在是从事什么专业，在这个跨学科学习和跨学科创业的新时代，相信你一定也能对未来的中国制造和国家富强做出你的贡献。

思考及实践

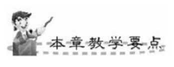
1. 什么是制造？狭义的制造和广义的制造有什么不同？

2. 自己查阅资料或到企业参观，看看汽车、电脑、塑料玩具是如何制造出来的？

3. 请查阅《离开中国制造的一年：一个美国家庭的生活历险》，领悟中国制造对于世界的意义，以及中国制造应该努力的方向。

4. 要实现我国从“制造大国”到“制造强国”的跨越式发展，我们青年学生要如何努力？

第2章 塑料及加工成型



知识要点	掌握程度	相关知识
塑料材料	了解塑料的发展史； 掌握塑料的种类； 熟悉工程塑料的用途	塑料的概念和特点； 塑料的发展史； 塑料的分类和用途
塑料挤出成型	掌握挤出成型的概念； 了解挤出成型设备的组成； 了解挤出机的工作过程	挤出成型的概念； 塑料挤出机的组成； 塑料挤出机的工作过程
塑料注射成型	掌握塑料注射成型的概念； 了解注塑机的结构组成； 熟悉注塑成型工艺过程	塑料注射成型的概念； 注塑机的结构组成； 注塑成型工艺过程

塑料的产生不过160年的历史，但是给人类的生活带来了翻天覆地的变化。我们每一天的生活，都离不开塑料。早上起床刷牙，你已经从亲密接触尼龙塑料开始了新的一天。包装和盛放食物已离不开塑料盒。只要外出购物，不论到超市还是去农贸市场，必定会带回一大堆塑料袋。甚至从一出生就开始接触塑料奶瓶和塑料面盆，从此贯穿于人的一生。塑料产品由于花样多、价格便宜，已经渗透到生活的方方面面。而强度高、绝缘性好的工程塑料零部件，也已经应用于建筑、汽车、电器等领域。

那么，什么是塑料？塑料真的与环保格格不入吗？塑料产品都是如何加工制造出来的？带着这些问题，让我们一起走进塑料的世界。

2.1 塑料材料

塑料，英文Plastic，来自希腊文Plastikos(可成型、有可塑性)，是指以树脂为主要成分，以增塑剂、填充剂、润滑剂、着色剂等添加剂为辅助成分，在加工过程中能流动成型的材料。

塑料是从高分子化合物加工制成的一类制品。高分子化合物最重要的特点是它的高分子量，通常分子量范围是10^4～10^7数量级。高分子化合物又称为大分子、高聚物、聚合物。由一种结构单元(单体)构成的聚合物称为均聚物，由两种或两种以上结构单元构成聚合物为共聚物。共聚是改善和提高聚合物性能的一个重要方法。例如，汽车和家用电器中广泛使用的ABS塑料就是一种共聚物。

高分子化合物的命名通常有三种：一是对于均聚物和加聚物，常采用通俗名法，即在单体前面加“聚”字，如“聚氯乙烯”、“聚丙烯腈”等；二是对于由两种单体缩聚而成的聚合物，如果结构比较复杂或不太明确，往往在单体名称后面加上“树脂”二字表示，如“酚醛树脂”、“脲醛树脂”等；三是采用商品名称或简写代号命名，如“涤纶”、“有机玻璃”、“PVC”、“PA66”。

值得注意的是，树脂这个名词应用范围现在扩大了，未加工成型的聚合物往往都叫树脂，如聚氯乙烯树脂、聚丙烯腈树脂等。

塑料主要有以下特性：

(1) 大多数塑料质轻，比强度和比刚度高；

(2) 化学稳定性好，不会锈蚀；

(3) 耐磨性和自润滑性好，摩擦系数小；

(4) 绝缘、绝热、隔声性能好；

(5) 成型性、黏接性、着色性能好，同时还具有多种防护性能。

由于塑料的优良特性，它的应用领域不断扩大，在汽车、计算机、机电、仪器仪表、医疗、建筑以及日用工业等许多行业均获得广泛的应用。如电视机壳体、电缆、塑料门窗、塑料袋、衣架、玩具等。

1. 塑料的发展史

塑料时代的开始以合成塑料、酚醛塑料(PF)的出现为标志。赛璐璐于1865年问世，是首批人造塑料。尽管德国化学家拜尔早在1872年就发现，苯酚和甲醛反应后，玻璃管

底部有些顽固的残留物。不过拜尔的眼光在合成染料上，而不是绝缘材料上。但美籍比利时化学家贝克兰(Leo Baekeland)发明了一种试验装置，能精确控制温度和压力，从而有效控制化学反应，并且比英国人斯文伯恩早一天递交了专利申请，因而成功合成酚醛树脂(俗称“电木”，一种热固性塑料)，成为“塑料之父”。

聚酰胺(PA)，俗称“尼龙”，它的出现是塑料时代的里程碑。其显著特点是具有热塑性，因此是一种热塑性塑料。关于聚酰胺的发明，流传着一段关于最早的企业进行基础性科研的佳话。聚酰胺(PA)由杜邦公司的卡罗瑟斯(Wallace Carothers)于1931年申请专利，1935合成PA，但由于原料和设备问题未能实现商业化。1935年卡罗瑟斯又合成PA66，开始了尼龙袜时代，实现了化学纤维的商业化。1938年，硬毛尼龙开始用于制造牙刷，开创了清洁牙齿的新时代。发明了尼龙后，袜子市场才发生了彻底的变化，第一批尼龙袜子样品于1939年出现在世界博览会上。1940年，高筒尼龙袜在美国创造历史最高销售纪录。至此，透明轻薄的尼龙袜配上裙子成为欧美贵妇人的时髦产品。

PA66实现商业化有三个条件：一是解决了原料，能够从苯酚大量生产己二酸，并从己二酸生产己二胺；二是解决了生产工艺和设备(熔体纺丝新技术及输送、计量、卷绕设备)的问题。

尼龙丝袜带给我们的启示：要实现实验室成果的商品化，即所谓的成果产业化，一是要解决原料的工业来源(大量而低廉)；二是要有成套的设备和技术。

卡罗瑟斯与杜邦公司的成功给我们的启示：与技术相比科学要走在前面，与生产相比技术要走在前面；没有科学研究，没有技术成果，新产品的开发是不可能的。

其他热塑性塑料在20世纪20年代至40年代如雨后春笋般地出现，1926年发明聚氯乙烯(PVC)，1930年发明聚苯乙烯(PS)，1931年发明有机玻璃(PMMA)，1933年发明低密度聚乙烯(LDPE)，1943年发明聚四氟乙烯(PTFE)等等。聚四氟乙烯，又称“泰富隆”、“塑料之王”，具有耐高温、耐化学腐蚀性能、介电性能好的特点，同时，它的摩擦系数极低。它的产生解决了机床、化工、石油、制药等领域的许多问题，广泛用于制造机床贴塑导轨，化工密封件、垫圈、垫片。

塑料时代的大发展的标志是聚乙烯(PE)和聚丙烯(PP)的出现。低密度聚乙烯(LDPE)和高密度聚乙烯(HDPE)由德国化学家齐格勒(K. Karl Ziegler)发明，而意大利化学家纳塔(Giulio Natta)合成了PP，聚烯烃发明的关键是发明催化剂，促进了聚合反应和材料分子排列。由于石油工业的快速发展，工业上可以大量从石油中提取PE和PP的单体乙烯和丙烯，从此，聚烯烃类塑料成为使用量最大的塑料品种，占到塑料总产量的30%以上。

由于塑料具有廉价、轻质、绝缘、不易腐蚀、不易生锈、易塑、多样等特点。从20世纪40年代开始，塑料产业步入快速发展的时代。20世纪40年代，人造纤维产品超过羊毛产量。20世纪50年代，塑料产量超过了铝(体积)。20世纪80年代，塑料产量超过了钢铁(体积)。2003年，塑料产量突破2亿吨。

2007年，伦敦科学博物馆举办了纪念合成塑料问世百年的展览。科学博物馆馆长苏珊·莫斯曼说：“塑料的故事是过去百年材料世界的核心线索之一。有了塑料，才有消费革命，收音机、电视、计算机、合成纤维、一次性用具才得以大量生产。”

2. 塑料的分类

塑料种类很多，到目前为止世界上投入生产的塑料大约有三百多种。塑料的分类方法

较多，常用的有两种。

1）热塑性塑料和热固性塑料

根据塑料受热后的性质不同，可以将塑料分为热塑性塑料和热固性塑料。热塑性塑料分子结构都是线性结构，在受热时发生软化或熔化，可塑制成一定的形状，冷却后又变硬。在受热到一定程度又重新软化，冷却后又变硬，这种过程能反复进行多次。如聚乙烯、聚氯乙烯、聚苯乙烯等。热塑性塑料成型过程比较简单，能够连续化生产，并且具有相当高的机械强度，因此发展很快。

热固性塑料的分子结构是体型结构，在受热时也发生软化，可以塑制成一定的形状，但受热到一定程度或加入少量固化剂后，就硬化定型，再加热也不会变软和改变形状了。热固性塑料加工成型后，受热不再软化，因此不能回收再用，如氨基塑料、酚醛塑料、环氧树脂等。热固性塑料成型工艺过程比较复杂，所以连续化生产有一定的困难，但其耐热性好，不容易变形，而且价格比较低廉。

2）通用塑料和工程塑料

根据塑料的用途不同，可将塑料分为通用塑料和工程塑料。通用塑料是指产量大、价格低、应用范围广的塑料，主要包括聚烯烃、聚氯乙烯、聚苯乙烯、酚醛塑料和氨基塑料五大品种。人们日常生活中使用的许多制品都是由这些通用塑料制成的，如图 2.1 所示。

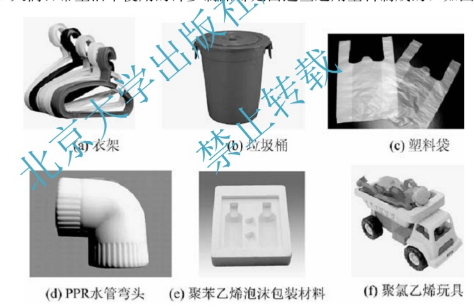


图 2.1 生活中的通用塑料制品

工程塑料是可作为工程结构材料和代替金属制造机器零件等的塑料，如聚酰胺、聚碳酸酯、聚甲醛、聚四氟乙烯、聚酯等。工程塑料具有密度小、化学稳定性高、机械性能良好、电绝缘性优越、加工成型容易等特点，广泛应用于汽车(图 2.2)、电器、化工、机械、仪器、仪表等工业领域。

常用塑料的特性和用途见表 2-1。

3. 塑料的成型特性

塑料成型是将各种形态(粉料、粒料、溶液和分散体)的塑料制成所需形状的制品或坯件的过程。塑料成型方法的选择主要取决于塑料的类型(热塑性还是热固性)、起始形态以及制品的外形和尺寸。经过上百年的发展，塑料成型的方法已达三十多种。加工热塑性塑



(a) PC聚氨酯汽车座椅



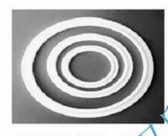
(b) 聚甲醛齿轮



(c) 尼龙降落伞



(d) PC冰箱冷冻抽屉



(e) 聚四氟乙烯阀门专用密封圈



(f) 聚酯(PET)方向盘

图 2.2 汽车上的工程塑料制品

表 2-1 常用塑料性能与用途

塑料名称	性　　能	用　　途
聚甲醛(POM)	综合性能良好，强度、刚性高，抗冲击、疲劳，减摩耐磨性好，吸水率低，尺寸稳定性好，但热稳定性差，易燃烧，长期曝晒易老化	适用于制作减摩零件、传动零件、化工容器及仪器仪表外壳；齿轮、把手、螺杆、输油管、飞轮等
聚碳酸酯(PC)	有突出的冲击强度、较高的弹性模量和尺寸稳定性。无色透明，着色性、耐腐蚀性、耐热性、耐磨性、电绝缘性较好，但自润性差，有应力开裂倾向	适用于制作仪表小零件、绝缘透明和耐冲击零件；照相机本体、机具外壳、安全帽、潜水镜、安全镜片、管材、绝缘套、防护罩、螺杆等
聚苯乙烯(PS)	电绝缘性优良，无色透明，透光率仅次于有机玻璃纤维，着色性、耐水性、化学稳定性良好，机械强度一般，但性脆，易产生应力碎裂，不耐苯、汽油等有机溶剂	适用于制作绝缘透明件、装饰件及化学仪器、光学仪器等零件，在工业上：仪器仪表零件、灯罩、透明模型等；在日用品方面：包装材料、装饰材料、各种容器、玩具等
聚丙烯(PP)	聚丙烯是塑料中最轻的，强度、刚度、硬度、耐热性均优于PE，可在100℃左右使用。具有优良的耐腐蚀性，良好绝缘性，不受湿度的影响，但低温变脆，不耐磨，易老化	适用于制作一般机械零件、耐腐蚀零件和绝缘零件；水管、胶膜、胶布、容器、铰链 、洗发液瓶盖、一次性注射器管、水桶、渔网、滤布等
丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)	综合性能良好，冲击韧性、机械强度较高，尺寸稳定，耐化学性、电性能良好；易于成型，与372有机玻璃的熔接性良好，可作双色成型塑料制品，且表面可镀铬	广泛应用于家用电子电器、工业设备及日常生活用品等领域；如计算机、电视机、录音机、电风扇等壳体；工业机械中的齿轮、轴承、仪器仪表盘等，玩具、包装容器、家具等

续表

塑料名称	性 能	用 途
聚乙烯(PE)	耐腐蚀性，电绝缘性(尤其高频绝缘性)优良，可以氯化，可用玻璃纤维增强 高密度聚乙烯(HDPE)熔点，强度和硬度较高，吸水性小，有突出的电气性能和良好的耐辐射性 低密度聚乙烯(LDPE)柔软性，伸长率，冲击强度和透明性较好	高密度聚乙烯适用于制作塑料管、塑料板以及承载不高的零件，如齿轮、轴承等 低密度聚乙烯适用于制作塑料薄膜、软管、塑料瓶以及电器工业的绝缘零件和包覆电缆等
聚氯乙烯(PVC)	硬聚氯乙烯(UPVC)机械强度高，电气性能优良，耐酸碱力极强，化学稳定性好，但软化点低 软聚氯乙烯(SPVC)伸长率大，耐腐蚀性、电绝缘性均低于硬聚氯乙烯，且易老化	硬聚氯乙烯适用于制作防腐管道、管件、输油管、离心泵、鼓风机、插座、插头、开关、电缆等 软聚氯乙烯适用于制作薄板、薄膜、电线电缆包覆层、密封件、凉鞋、雨衣、玩具、人造革等
聚砜(PSF)	耐热耐寒性，尺寸稳定性优良，耐酸，耐碱，耐高温 硬度和冲击强度高，可在－65～＋150℃下长期使用，在水、湿空气或高温下仍保持良好的绝缘性	适用于制作耐热件、绝缘件、减摩耐磨传动件、仪器仪表零件、计算机零件等

料常用的方法有挤出、注射成型、压延、吹塑和热成型等，加工热固性塑料一般采用模压、传递模塑，也用注射成型。在这些方法中，以挤出和注射成型用得最多，也是最基本的成型方法。

常用塑料的成型工艺特性包括：收缩率、流动性、比容及压缩率、硬化特性等。其中，成型收缩受到各成型因素的影响，但主要决定于塑料品种、塑件形状及尺寸。塑料在一定温度与压力下填充型腔的能力称为流动性。这是模具设计时必须考虑的一个重要工艺参数。

4. 关于塑料的争议

(1) 贵还是贱?

塑料是一种人工合成物，因为本身的可热熔性能够注塑成型，也就擅长模仿原先木头、钢铁或者其他什么昂贵材料。1866 年，美国人海亚特使用赛璐珞的初衷据说是为了替代几乎让大象毁灭的象牙桌球，当时一颗象牙只能制造 5 个桌球。当然，塑料的模仿仅仅是出于实用，使用价值淹没了美学价值，所以，它无法赢得高贵的身份。而现在，我们生活里差不多每一种消费品都要仰仗塑料，至少是某个外壳或者部件。就像手机的“金属”外壳一样，轻飘飘的塑料表面经常要被喷涂成金属、水晶之类的质感，来获得一点关于贵重的视觉幻想。

(2) 污染还是环保?

20 世纪末，一份有关塑料袋无法在自然环境降解、造成全球性生态危机的调查报告，直接将塑料制品的公众形象从简便易用，拖入了环保公害行列，聚氯乙烯和聚碳酸酯的成分让所有塑料品种都背负上了坏名声，甚至直接被医生们与诸多疾病挂上了钩。全球每年接近 1 亿吨的塑料制品产量，依旧在以每年 10%的速度递增，这不单单直接造成了自然环

境的危害，更是让传统时代摆弄木头、瓷器、金属、皮革这些自然材质的手工制造者彻底走向了稀有的工匠之列。而塑料制品的廉价，更在100年间让人们买了太多自己并不需要的东西，仅仅是因为价格便宜。塑料的，用坏了就扔，这种没有节制的消费观念伴随塑料工艺的不断改良而愈演愈烈。然而，没有塑料包装，你还能想象超市的食品如何保鲜，没有塑料做门窗家具，大自然的树木又能剩下几棵？其实绝大部分热塑性塑料都可以回收再利用，大家关心环保和健康，关键在正确选用塑料制品和以实际行动分类回收。抵制使用塑料，就像那位抵制中国制造的美国记者一样，一样会让我们的生活寸步难行。就算婴儿奶瓶，任何父母可能都不想用塑料，但是难道用玻璃和不锈钢更安全更可行？

2.2 塑料挤出成型

你大概吃过爆米筒吧，也许你见过爆米筒加工机的神奇。如图2.3所示，大米和白糖倒进机器料斗里，很快，舌尖上的零食——爆米筒就源源不断地从机器的“嘴”里“挤”出来。塑料挤出成型过程和机加工爆米筒是有很多类似的地方。

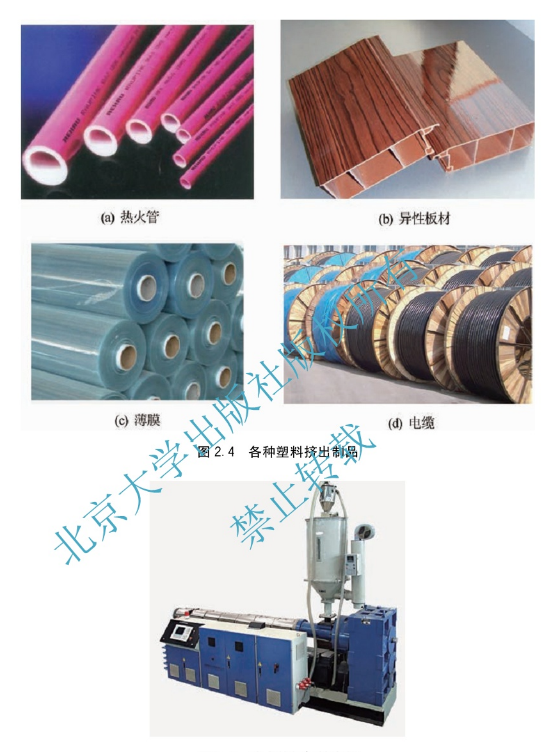
塑料挤出成型是使用挤出设备生产具有相同截面形状而长度任意的塑料制品(如塑料管、棒、板及各种异型材等)的成型加工方法，绝大部分热塑性塑料和少数热固性塑料可用此法加工。据统计，在塑料制品成型加工中，挤出成型制品的产量居首位。



图2.3 爆米筒生产现场

塑料挤出成型生产过程是连续的，可根据需要生产任意长度的产品。生产效率高，应用范围广，能生产各种管材、棒材、板材、薄膜、单丝、电线电缆、异型材以及中空制品，如图2.4所示。挤出设备投资少，见效快，在改革开放初期，长三角和珠三角很多人都是靠几台挤出机赚到第一桶金。

随着塑料挤出成型工艺的广泛应用和发展，塑料挤出机的类型日益增多。按挤出螺杆的数量可分为无螺杆挤出机(如柱塞式挤出机)、单螺杆挤出机、双螺杆和多螺杆挤出机。按螺杆在空间位置的不同可分为卧式挤出机和立式挤出机。生产中，较常见的是卧式单螺杆挤出机，如图2.5所示。



(a) 热火管　(b) 异性板材

(c) 薄膜　(d) 电缆

图 2.4　各种塑料挤出制品

图 2.5　卧式单螺杆挤出机

1. 挤出成型设备的组成

为满足挤出成型过程的要求，挤出设备一般由挤出机(图 2.6)、辅机和控制系统三大部分组成。

挤出机主要由挤出装置、传动装置、加热冷却装置和机身等组成。挤出装置主要由螺杆 1 和料筒 2 组成，是挤出机的关键部分。塑料通过挤出装置塑化成均匀的熔体，并在挤压压力作用下，被螺杆以定量、定压、定温地从机头连续挤出。传动装置用于驱动螺杆，

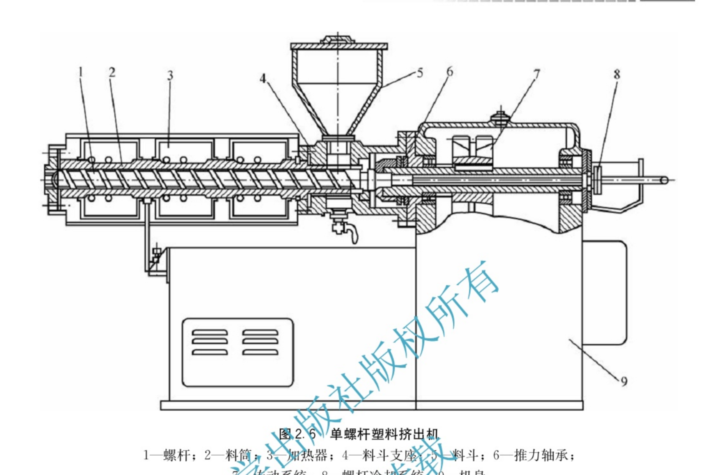


图2.6　单螺杆塑料挤出机

1—螺杆；2—料筒；3—加热器；4—料斗支座；5—料斗；6—推力轴承；
7—传动系统；8—螺杆冷却系统；9—机身

保证螺杆挤出过程中所需的力矩和转速。加热冷却装置的作用是保证塑料和挤出装置在成型过程中的温度达到工艺要求。

如图2.7所示为吹塑薄膜挤出辅机。挤出成型设备的辅机主要由机头、定型装置、冷却装置、牵引装置、卷取装置和切割装置组成。机头是挤出成型的主要部件，熔料通过它获得一定的截面形状和尺寸。定型装置对制品进行精整，获得更为精确的截面形状、尺寸和更好的表面质量。冷却装置将定型后的塑料制品充分冷却，获得制品最终的形状和尺寸。牵引装置为挤出制品提供一定的牵引力和牵引速度，保证挤出过程稳定性地进行，并能对制品的截面尺寸进行调节和控制。卷取装置将柔性制品(如薄膜、软管、电线电缆等)卷绕成卷。切割装置将非柔性制品切成所需的长度(或宽度)。

挤出机的控制系统主要由电气元件、仪表和执行机构组成，其主要作用有：

(1) 控制挤出主、辅机的动力源(电动机)，为挤出工艺提供所需的转速和功率。

(2) 对主、辅机的工艺参数(如温度、压力、挤出速率等)进行控制，保证制品质量。

(3) 实现整个挤出机组的自动控制，保证主、辅机协调地运行。

通常将挤出主机、辅机和控制系统三部分统称为挤出机组。通常主机在挤出机组中是最主要的部分，而主机中挤出装置又是最关键的部分；在辅机中机头是最关键的部分。

2. 挤出机的工作过程

如图2.8所示，塑料自料斗进入螺杆后，在螺杆旋转作用下，物料向前输送，在螺杆加料段，松散的固体物料充满螺槽，随着物料的不断向前输送，开始被压实。当物料进入压缩段后，由于螺杆螺槽深度逐渐变浅以及机头的阻力作用，使塑料所受的压力逐渐升

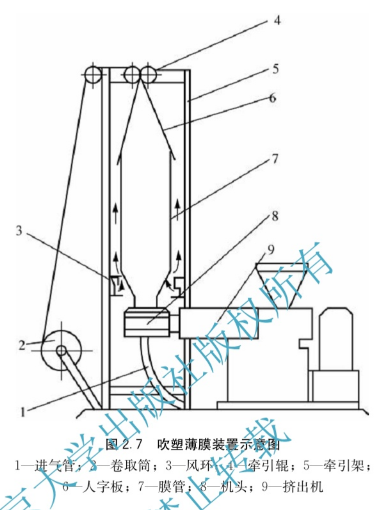


图 2.7　吹塑薄膜装置示意图

1—进气管；2—卷取筒；3—风环；4—牵引辊；5—牵引架；
6—人字板；7—膜管；8—机头；9—挤出机

高，并被进一步压实。与此同时，在料筒外加热器的加热和螺杆与料筒内表面对物料的强烈搅拌、混合和剪切摩擦产生的剪切热的共同作用下，塑料温度不断升高，当部分塑料的温度达到熔点后，开始熔融。随着物料的输送，继续加热，熔融的物料量逐渐增多，而未熔融物料量相应减少，接近压缩段的末端时，全部物料都将转变为黏流态，但此时各点温度尚不均匀，经过均匀段的均化作用后熔体温度变得较均匀，最后由螺杆将熔融物料定量、定压、定温地挤入机头。物料通过机头后获得一定的截面形状和尺寸，再经过冷却定型等工序，便可获得所需的塑料挤出成型制品。

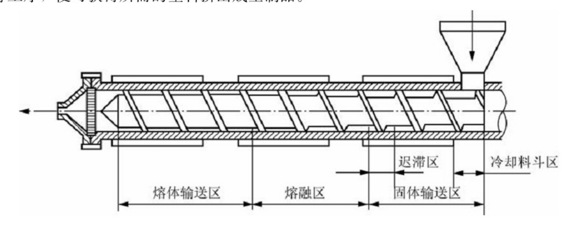


图 2.8　塑料在普通单螺杆挤出机中的挤出过程简图

2.3 塑料注射成型

塑料注射成型是将固态(玻璃态)的塑料原料经塑化装置转化为熔融态(黏流态)，在压力作用下注射入密封的模腔内，经保压冷却定型后，开模顶出而获得塑料制品的一种成型方法。塑料注射成型机(简称注塑机)是塑料注射成型加工的主要设备。最早的注塑机类似一个医用注射器，是用柱塞将熔融的塑料注射到模具中，形成需要的塑料制品，如图 2.9 所示，为一台国产的卧式伺服液压注塑机。



图 2.9 卧式伺服液压注塑机

注塑机主要用于热塑性塑料的注射成型，近年来由于注射工艺和设备技术的发展，已成功地用于部分热固性塑料的注射成型，并随着塑料材料等方面的发展应用范围进一步扩大，出现了许多新的注射工艺和注射成型机。塑料注射成型能够一次成型出形状复杂、尺寸精确、表面质量高的制品；同时，具有生产率高、适应性强、工艺稳定、易于控制、便于实现自动化等一系列优点，因此得到了广泛应用。

1. 注射机的基本结构组成

塑料注射成型时，每一工作循环注射机应完成塑料的塑化、注射保压、冷却成型、顶出制品等基本过程。因此，注射机主要由注射装置、合模装置、液压传动系统和电气控制系统等组成，如图 2.10 所示。

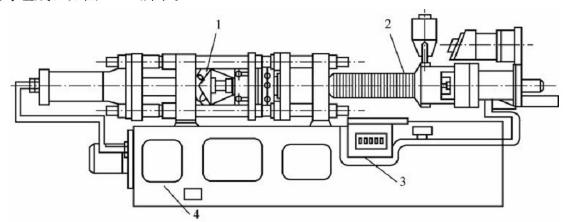


图 2.10 往复螺杆式注射机的组成

1—合模装置；2—注射装置；3—电气控制系统；4—液压传动系统

注射装置实现塑料原料的塑化、计量，并将熔料以一定压力射出，合模装置实现成型模具的启闭、锁紧和制品的脱模，液压传动系统实现成型过程中所需能量的转换与传递，而电气控制系统则是实现工作循环及工艺条件的设定与控制。

注射机按外形结构特点可分为立式、卧式、直角式三类。按合模装置的驱动方式可分为机械式、液压式和全电动式三大类，机械式因其锁模力及模版移动行程有限、工作噪声大，现在基本淘汰。液压驱动较平稳安全，而全电动式注塑机由于采用数控和变频技术，节能环保且高度自动化，是一种在快速发展的注塑机。

按成型工艺特点，注塑机还可分为热塑性塑料注射机、热固性塑料注射机、反应注射机、结构发泡注射机、注射吹塑成型机、注射—拉深—吹塑成型机、气体辅助注射机、复合注射机、排气注射机、转盘式注射机、旋转式注射机、双色注射机等多种形式。比如，双色牙刷柄就是采用双色注射机生产出来的，而大尺寸的电视机外壳则是用气体辅助注射机和气体辅助注射模具来完成生产的，而包装泡沫材料和汽车微孔内饰件是采用结构发泡注射机进行生产，各式各样的注塑机适应了塑料制品的多样化、个性化、大型化、微型化的具体需要。

2. 注射成型工艺过程

注射机的种类虽然很多，但其注射成型的工艺过程是基本相同的。现以最常用的螺杆式注射机为例加以阐述。注射成型的一个工作循环包含如下主要工序：塑料预塑、合模、注射、保压、制品冷却定型、开模顶出制品等。其工作过程循环框图如图 2.11 所示。

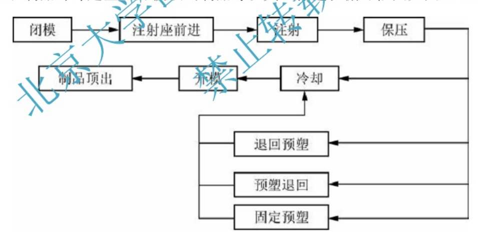


图 2.11　注射成型工作过程循环框图

1）塑料预塑

随着螺杆的转动，落入料筒加料口的塑料被不断向前输送，在输送过程中，塑料原料被压实，同时，在料筒外加热和螺杆摩擦剪切热的作用下，塑料温度不断升高，被逐渐塑化成黏流态向螺杆头部聚集，并建立起一定的压力。当螺杆头部的压力大于注射液压缸活塞后退阻力(背压)时，螺杆开始边转动边后退，料筒前端的熔料逐渐增多。当螺杆退到设定注射量位置时，计量装置撞击行程开关，螺杆停止转动和后退，完成一次塑化计量过程。

2）合模、注射

预塑完成后，合模装置动作，模具闭合。注射座前移，当喷嘴紧贴模具浇口套后(固

定加料时，注射座不移动），注射液压缸工作，使螺杆按设定压力和速度推进，将熔料注入模腔内。

3）保压、冷却

当熔料充满模腔后，螺杆对熔料保持压力一段时间，以防模腔内的熔料倒流，并向模腔补充因制品冷却收缩所需的塑料，当内浇口冻结保压结束后，螺杆就可开始进行下一工作循环的塑化工序，为下一次注射做好准备。

4）开模顶出制品

制品冷却定型后，打开模具，顶出机构顶出制品。

从注射成型工作过程循环框图可知，注射成型过程并非按动作顺序依次排列，在时间上有的工序会出现重复。

思考及实践

1. 试着思考和分辨你日常使用的塑料制品，如矿泉水瓶、塑料袋、脸盆、鼠标外壳、汽车防滑垫，大概会是什么牌号的塑料？

2. 如果有机会，就近观察一下爆米筒是如何加工出来的，建议打开机器看一看。

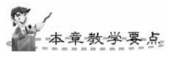
3. 试想一下，鼠标外壳、塑料桌布、牙刷毛等是如何制造出来的，建议查查资料或到塑料制品厂去参观一下。

4. 请你睡觉前回想一下，你今天从早到晚都用到了哪些塑料制品？列出清单。

5. 你觉得未来的塑料会向什么方向发展？

6. 你能构思一种新的塑料产品吗？或者对你常用的塑料制品进行改进，可尝试申请一个外观专利。

第3章 橡胶及加工成型



知识要点	掌握程度	相关知识
橡胶材料	了解橡胶的发展史； 熟悉橡胶的分类； 了解橡胶的配方	橡胶的发展历程和特点； 橡胶的分类； 橡胶的配方和各成分的作用
橡胶的加工成型	了解橡胶制品的生产工艺流程； 熟悉塑炼、混炼、压延和硫化等工艺	橡胶制品的生产工艺流程； 塑炼、混炼、压延和硫化的作用和加工设备
轮胎的加工	了解轮胎的结构； 了解轮胎生产的主要工艺流程	轮胎的重要性和子午线轮胎的结构； 轮胎生产的主要工艺流程

橡胶是一种常见的高分子材料，由于其具有高弹性，良好的耐磨性、绝缘性、隔音性和阻尼特性，橡胶被广泛适用于工业、农业、医疗以及日常生活等方面，从运动鞋到汽车轮胎，从医疗手套到传送带，橡胶之用无处不在，如图 3.1 所示。



图 3.1 橡胶的用途

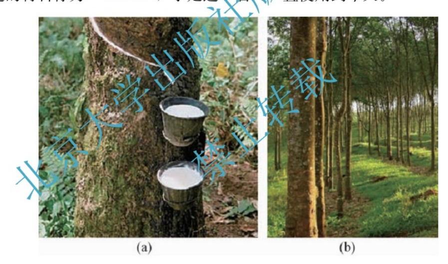
橡胶为什么会有这么广泛的用途？下面我们先从橡胶材料的发展历史谈起，然后了解常见橡胶的种类和组成，最后以轮胎为例，看看橡胶制品是如何加工出来的。

3.1 橡胶材料

1. 橡胶的发展史

橡胶是一种高弹性的高分子化合物，分子量一般在10万以上，由于橡胶具有其他材料所没有的高弹性，因而也称作弹性体。

人们对于橡胶的认识源于大自然的恩惠——橡胶树。橡胶树是一种热带植物，原产于亚马逊河流域，印第安人称这种被砍后流出乳液的树为cau-uchu，含义是“流泪的树”，如图3.2所示。天然橡胶发现很早，远在十一世纪，海地印第安人用天然橡胶所做的球进行比赛。直到哥伦布第二次航行探险时(1493—1496)，才将橡胶带到了欧洲，欧洲人才开始认识天然橡胶。1735年法国科学家康达明(Charles de Condamine)参加了南美考察队，把一些最早的橡胶制品带到欧洲，并描述了印第安人利用橡胶树乳汁的情况。1770年，英国化学家普里斯特利(J. Joseph Priestley)发现，橡皮可以用来擦去铅笔的字迹。当时，将这一用途的材料称为“rubber”，于是这个名词一直使用到今天。



(a) (b)

图3.2 天然橡胶

橡胶的工业研究和应用开始于十九世纪初。世界上第一个橡胶工厂于1820年在英国哥拉斯格建立。为使橡胶便于加工，1826年，汉考克(Thomas Hancock)发明了开放式炼胶机，使天然橡胶获得塑性，这种机器还可以把橡胶边角料捏合在一起，使之成块以重新利用，这是橡胶加工业的重大突破。

生胶有一个致命的缺点，就是对温度过于敏感，温度稍高它就会变软变黏，而且有臭味，而温度降低它就会变脆变硬，这一缺点使得早期的橡胶工业无一例外地陷入了危机。美国人固特异(Charles Goodyear)终其一生致力于研究消除橡胶发黏的方法，并取得了重大的成果。1839年初的一天，他不小心把胶乳和硫黄的混合物泼洒在热火炉上，把它刮起来冷却后，发现这东西已没有黏性，拉长或扭曲时还有弹性，能恢复原状，原来能溶解生胶的溶剂对它不再起作用了。由此，固特异发明了橡胶的硫化法，解决了生胶变黏发脆问题，使橡胶具有较高的弹性和韧性，橡胶才真正进入工业实用阶段。固特异的硫化过程涉及橡胶单体异戊二烯的聚合与交联，这是今天上百亿美元橡胶工业的基础。固特异探索

橡胶硫化的过程并没有给自己带来财富，反而是贫困交加，他留下的不仅是硫化橡胶这一伟大发明，还有在逆境中不断探索的精神。从此，橡胶技术有了飞跃的发展，橡胶成了世界上最重要的工业原料之一。

1888年，英国医生邓录普(J. B. Dunlop)发明了充气轮胎，1890年，轮胎被Dunlop用到自行车上，到了1895年，被用在各种老式汽车上。从此，橡胶的应用得到了空前发展。在固特异去世后的38年以后(1898年)，为了纪念固特异对美国橡胶工业做出的巨大贡献，弗兰克·斯伯林(Frank Seiberling)把自己创建的轮胎橡胶公司命名为固特异。

十九世纪是个出奇迹的时代，许多影响人类的重大发明都源自那时，十九世纪也是个培养发明家的时代，横空出世了许多响亮的名字。面对那些众多的发明家，却很容易把他们分成两类：一类凭借自己发明，腰缠万贯，名利双收，他们中以爱迪生、诺贝尔为代表。汽车业里的卡尔·本茨和高特利布·戴姆勒也依靠自己的发明创造了自己的产业。但也有命运不济的一类，他们虽殚精竭虑，不断求索，但一生都贫困潦倒，直到死后其价值才被人们认识。像柴油机的发明者鲁道夫·迪赛尔，他与他的发明一生不被别人重视，最后债台高筑，溺毙于大西洋中。“橡胶硫化技术”的发明者查尔斯·固特异很不幸地与迪赛尔归到了一类。当有些人因兴趣而进行发明的时候，他则是为了还债而进行发明的。

使用有机硫化促进剂提高了生产效率后，橡胶制品的应用范围不断扩大，天然橡胶已经远远不能满足需要，合成橡胶对开拓橡胶工业的应用领域作出了杰出的贡献。

人工合成橡胶的思路首先来自对天然橡胶的剖析和仿制，后来借助于化学分析、光谱法、X-射线衍射法、电子显微镜法、热分析等方法，人们了解到橡胶的分子结构，到20世纪70年代，进入到高性能橡胶分子结构的设计阶段。

橡胶的特点有：

(1) 具有优良的弹性，在受到应力作用后会发生明显的形变，但应力消失后又会发生回弹，恢复原有形状。

(2) 具有优异的气密性，可以有效阻隔水、气体等的进入。

(3) 通常都具有良好的化学稳定性，尤其是交联结构的橡胶不溶于有机溶剂中。

(4) 具有良好的耐磨性。

2. 橡胶的分类

橡胶可分为天然橡胶和合成橡胶，合成橡胶又可分为通用橡胶和特种橡胶。

1) 天然橡胶(NR)

天然橡胶是将橡胶树中流出的胶乳，经凝固干燥后，加压制成生胶，再经硫化处理得到的。生胶是以异戊二烯为主要成分的不饱和天然高分子化合物，是多种不同分子量的聚异戊二烯混合体。天然橡胶的综合性能很好，弹性模量为3～6MPa，延伸率为100%～1000%，耐磨性、电绝缘性能和耐碱性好，但耐油和耐氧化性差，使用温度约为－76～110℃。

2) 通用合成橡胶

凡是性能与天然橡胶相近，物理机械性能和加工性能较好，能广泛用于轮胎和其他一般橡胶制品的，称为通用合成橡胶。主要种类有：

(1) 丁苯橡胶(SBR)。

丁苯橡胶是最早工业化的合成橡胶，也是合成橡胶中产量和消耗量最大的胶种。一般由丁二烯与苯乙烯共聚而成。1933年德国采用乙炔合成路线首先研制出高温乳液聚合丁

苯橡胶；1937 年由德国 Farben 公司首先实现工业化；50 年代初，出现了性能优异的低温(5～8℃)丁苯橡胶。目前，丁苯橡胶(包括胶乳)的产量约占整个合成橡胶生产量的 55%，低温乳聚丁苯橡胶约占整个丁苯橡胶产量的 80%。

(2) 顺丁橡胶(BR)。

顺丁橡胶为顺式-聚丁二烯(简称顺丁)橡胶。这种橡胶是由丁二烯聚合成的高弹体。其弹性、耐磨性、耐候性均较天然橡胶好，耐磨性比丁苯橡胶高 20%以上，缺点是抗裂性和加工性能差。顺丁橡胶多用于制造胶带、绝缘制品等。

其他通用合成橡胶还有异戊橡胶(IR)、丁基橡胶(HR)等。

3) 特种合成橡胶

凡是具有特殊性能，专门用于制作耐热、耐寒、耐化学物质腐蚀、耐溶剂、耐辐射等特种橡胶制品的橡胶称为特种合成橡胶。

(1) 丁腈橡胶。

丁腈橡胶的聚合单体为丁二烯和丙烯腈。其特性是耐油性、耐磨性、耐老化好，是通用耐油橡胶，可在－40～120℃下使用，主要应用于油封、衬垫、耐油胶管、输送带、印刷胶辊、纺织皮辊等油工业制品。

(2) 硅橡胶。

硅橡胶是由各种硅氧烷聚合而成的。主链全是由硅、氧两种原子所组成。根据所用硅烷化学结构的不同，硅橡胶有不同的品种和特性。硅橡胶在－70℃仍有良好的弹性。硅橡胶由于主链是 Si-O 键，键能大，所以具有较高的耐热性能，是目前最好的既耐高温又耐严寒的橡胶，它的耐老化性、电绝缘性也非常好，是制造航空工业用垫圈、油封、防震配件、电绝缘制品以及人造器官和美容业的宝贵材料。

其他特种合成橡胶有热塑性橡胶(TPE)、氟橡胶(FR)、聚氨酯橡胶(UR)、丙烯酸酯橡胶(AR)等。其中，热塑性橡胶是在常温下具有橡胶弹性，而在高温下能像热塑性塑料一样易于塑化成型的一类新型高分子材料。热塑性橡胶在常温下是两相体系，以 SBS 为例，其中的聚丁二烯相当于橡胶相，而聚苯乙烯相当于结晶相，聚丁二烯部分构成连续相，聚苯乙烯分散于其中。聚丁二烯决定了材料的高弹性能、良好的低温性能、耐磨性能。而聚苯乙烯则起物理交联点的作用。

3. 橡胶的配方

橡胶混炼配方主要包括生胶、硫化剂、促进剂、活性剂、补强剂、增塑剂、防老剂、防焦剂等。各成分的作用见表 3-1。

表 3-1 橡胶混炼配方

序号	组成要素	作用说明
1	生胶	也叫原胶，没添加其他成分
2	硫化剂	能使橡胶发生硫化(交联)的化学物质。如硫黄、过氧化物、金属氧化物、酯类化合物、胺类化合物等
3	促进剂	能缩短硫化时间，降低硫化温度，减少硫化剂用量，提高和改善硫化胶力，如 M、DM、TMTD、CZ、NOBS 等，它们可单用或并用
4	活性剂	能增加促进剂活性，提高硫化速度和硫化效率，改善硫化胶性能的化学物质。如 ZnO、硬脂酸等

续表

序号	组成要素	作用说明
5	补强剂	能改善橡胶的力学性能，如提高拉深强度、耐磨性、撕裂强度，从而达到提高使用性能，延长使用寿命的作用。如炭黑，白炭黑
6	增塑剂	也叫软化剂，降低胶料硬度。大部分是油类，如DOP-商业塑化剂、环氧大豆油、石蜡油等
7	防老剂	增强橡胶抵抗光，热，氧气，臭氧，紫外线等破坏的物质，如4010－NA，RD等。
8	防焦剂	少量添加到胶料中能防止或延缓胶料在硫化前的加工和储存过程中发生早期硫化(焦烧)现象的物质
9	其他	如着色剂，分散剂，抗静电剂，阻燃剂，发泡剂，增黏剂等

3.2 橡胶的加工成型

从原材料(生胶、配合剂)出发，要经过很多道工序才能完成橡胶制品的生产，如图3.3所示。这里重点介绍一下塑炼、混炼、压延和硫化等几道工序。

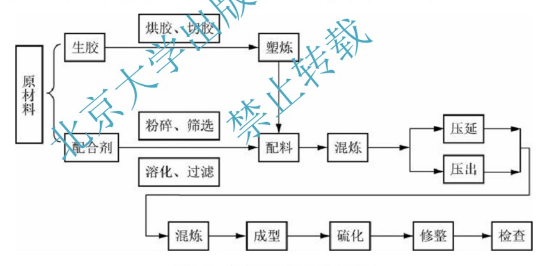


图3.3 橡胶制品的生产工艺流程

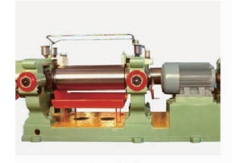
1. 塑炼

塑炼就是在橡胶的加工过程中，首先通过机械、热、氧和加入化学试剂等方式，使生胶由强韧的弹性状态转变为柔软、便于加工的塑性状态。塑炼的目的是使生胶获得一定的可塑性，使之适合于混炼、压延、挤出和成型等工艺操作。使生胶的可塑性均匀化，以便制得质量均匀的胶料。

要增加橡胶的可塑性或塑性变形，必须使橡胶分子易于发生大分子链的位移运动，但橡胶的分子链很长，分子间吸引力大且线性分子之间存在大量缠结点，大大阻碍了长链分子的位移运动。所以减少橡胶分子链的长度(降低分子量)，是降低分子间作用力、增大橡胶分子的塑性变形的最有效方法。大家可以想象一下，一堆又长又乱的线团，如果要抽出一根线来用，比较好的办法就是先剪断再来整理。实验表明，在热、光、氧气、机械力和

某些化学药品的作用下，橡胶分子主链和侧链都可以断裂。

工艺上用以降低橡胶分子量获得可塑性的塑炼方法可分为机械塑炼法和化学塑炼法两大类。其中，机械塑炼法是指采用开炼机、密炼机、螺杆塑炼机等的机械作用切断分子链而获得生胶可塑性，图 3.4 为橡胶开炼机和密炼机。而化学塑炼法则是在化学药品的作用下，使橡胶大分子链解聚而达到塑化的目的。这里只介绍更常用的机械塑炼法。



(a) 开炼机



(b) 密炼机

图 3.4　橡胶塑炼设备

开炼机结构简单、制造容易、维修方便，但消耗人力。而密炼机是一种高强度间隙性的混炼设备，密炼机转子比开炼机辊筒转速高，转子的断面结构复杂，胶料在密炼室中受力作用面较开炼机大，密炼机转子表面有棱面花纹，使胶料翻转并沿着转子的轴向中心翻动，起到了开炼机手工捣胶的作用，密炼室内炼胶时摩擦生热大，温度较高，使得橡胶受到剧烈的氧化裂解作用，促使生胶塑性增大。

在螺杆机中进行塑炼，生胶一方面受到螺杆的强烈机械搅拌作用，另一方面由于生胶受螺杆与机身间的摩擦而产生大量热，温度可高达 150～180℃，从而加速氧化裂解，获得塑炼效果。

2．混炼

目前，混炼工艺按其使用的设备，一般可分为开炼机混炼和密炼机混炼两种。

开炼机混炼是在炼胶机上先将橡胶压软，然后按一定顺序加入各种配合剂，经多次反复捣胶压炼，采用小辊距薄通法，使橡胶与配合剂互相混合以得到均匀的混炼胶。

加料顺序对混炼操作和胶料的质量都有很大的影响。不同的胶料，根据所用原材料的特殊性，采用一定的加料顺序。通常加料顺序为：生胶(或塑炼胶)、小料(促进剂、活性剂、防老剂等)、液体软化剂、补强剂、填充剂、硫黄。

生产中，常把个别配合剂与橡胶混炼做成母炼胶，如促进剂母炼胶，或把软化剂配成膏状，再用母炼胶按比例配料，然后进行混炼。这样可以提高混炼的均匀性，减少粉剂飞扬，提高生产效率。开放式炼胶机混炼的缺点是粉剂飞扬大、劳动强度大、生产效率低，生产规模也比较小；优点是适合混炼的胶料品种多和可制造特殊胶料。

密炼机混炼一般要和压片机配合使用，先把生胶配合剂按一定顺序投入密炼机的混炼室内，相互混合均匀后，排胶于压片机上压成片，并使胶料温度降低(不高于 100℃)，然后再加入硫化剂和需低温加入的配合剂，通过捣胶装置或人工捣胶反复压炼，以混炼均匀。

有些胶料如氯丁胶料，顺丁胶料经密炼机混炼后，于压片机下片冷却，并停放一定时间，再次回到密炼机上进行混炼，然后再在压片机上加入硫化剂，超促进剂等，并使其均匀分散，得到均匀的混炼胶，这种混炼方法叫做二段混炼。密炼机的加料顺序一般为：生胶、小料(包括促进剂、活性剂、防老剂等)、填料、补强剂、液体增塑剂。

要得到质量好的混炼胶，应根据胶料性质来决定合适的容量，加料顺序以及混炼的时间、温度、上顶栓的压力等工艺条件。

除上述两种混炼方法外，目前还有一种新的螺杆混炼机(传递式混炼机)混炼法，其特点是连续混炼，生产效率高。可使混炼与压延、压出联动，便于实现自动化。

3. 压延

压延工艺可分成压片、贴胶、擦胶和压型等不同的工序。从原理上看，压延过程主要是通过两个辊筒作用把胶料碾压成具有一定厚度和宽度的胶片的过程。从表面上看，压延只是胶料造型的变化，但实质上是一种流体流动过程。在压延过程中，胶料一方面发生黏性流动，一方面又发生弹性变形，如图 3.5 所示。

压延后的胶片容易出现一种纵横方向物理力学性能的差异，即在纵方向的抗张强度大、伸长率小、收缩率大，而在横方向的抗张强度小、伸长率大、收缩率小。这种纵横方向性能各异的现象叫压延效应。产生这种现象的原因主要是橡胶分子链及针状或片状的填料粒子，经压延后产生取向排列的结果。

图 3.5 压延过程示意图

从加工的角度来看，应该尽可能消除压延效应，否则会造成半成品的变形(纵横方向收缩不一致)，给操作带来困难。但从使用的角度来看，有些制品要求纵向强力高的则要利用之；有些制品需要强力分布均匀的，则要消除之。

4. 压出

压出是使胶料通过压出机连续制成各种不同形状半成品的工艺过程。它广泛应用于制造胎面、内胎、胶管、各种断面形状复杂或空心的半成品。压出工艺操作简单、经济，半成品质地均匀，生产能力大，是橡胶生产中的一个重要工艺过程。

压出机也称挤出机，由螺杆、机身、机头(包括口型和芯型)、机架和传动装置等部件组成。

在压出过程中，胶料的流动实际上是四种流动的组合，既不会有真正的倒流，也不会有完全封闭型的环流，而是以螺旋形的轨迹在螺槽中向前移动，如图 3.6 所示。

5. 硫化

硫化是橡胶制品制造工艺的最后一个过程，也是橡胶制品加工中最主要的物理-化学变化过程。硫化使未硫化胶料变成硫化胶，从而获得必需的物理力学性能和化学性能。许多产品的质量和使用寿命，在很大程度上取决于硫化过程。

橡胶硫化最早用于橡胶工业时，是指橡胶与硫黄共热的相互作用的过程。随着合成橡胶品种的增加和生产技术的发展，硫化方法和新型硫化剂越来越多，因此，“硫化”一词

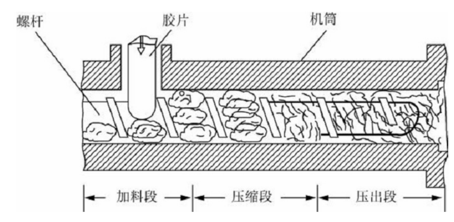


图 3.6　胶料在螺纹槽中的运动状况

的意义也需要加以修正。

现在看来，硫化过程的实质就是把塑性的胶料变成为具有高弹性橡胶的工艺过程。该过程要经历一个结构上的转变，即柔软的长链状橡胶分子在特定条件下变成为空间网状结构的过程，这个过程亦称为交联作用。简单地说，硫化的主要作用就是在分子链与分子链之间形成交联，从而使分子链间作用力量增强。

经过硫化后的橡胶性能有了很大的改变，如强度、硬度、伸长率、弹性等等，这些性能不仅取决于生胶的性能和配方，同时也取决于硫化体系和硫化条件决定的空间结构(如交联及交联度的不同)。

3.3　轮胎的加工

相对于汽车整体来说，轮胎不太起眼，可是轮胎对于车辆，犹如鞋子对于人，其重要性是绝对不可小视的，而且轮胎的结构也并不简单。常见的充气轮胎一般由外胎、内胎和垫带组成。外胎主要由胎冠、胎肩、胎侧和胎圈等部分组成，用来保护内胎不受损伤，且具有一定弹性；内胎中充满压缩空气；垫带放在内胎下面，防止内胎与轮辋硬性接触受损伤。

轮胎从结构设计上可分为：斜交轮胎和子午线轮胎。斜交轮胎，又称普通结构轮胎，其帘线按斜线交叉排列，胎侧刚度较大，舒适性差，由于高速时帘布层间移动与摩擦大，并不适合高速行驶。1946 年，法国米其林轮胎公司试制生产了全世界第一条子午线轮胎。子午线轮胎的发明是轮胎工业的一场革命，已成为汽车轮胎发展的新方向。由于子午线轮胎具有耐磨、节油、乘坐舒适，以及牵引性、稳定性和高速性能好的特点，使其获得了极快的发展。目前国际上子午线轮胎占市场的 80%，轿车和载重汽车子午线轮胎分别为 90%和 63%。子午线轮胎的不足有：因胎侧较薄，胎冠较厚，在其与胎侧的过渡区易产生裂口；侧面变形大，导致汽车的侧向稳定性差，制造技术要求高，成本也高。图 3.7 所示为子午线轮胎的结构。

轮胎的加工一般包括密炼、胶部件准备、轮胎成型、硫化、最终检验等工序，而胶部件准备工序又包括挤出、压延、胎圈成型、帘布裁断、贴三角胶条、带束层成型等六个工段。最主要的工序流程如图 3.8 所示。

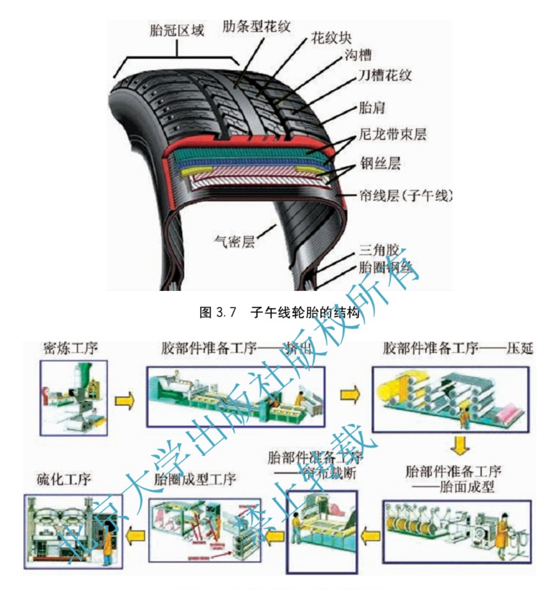


图 3.7 子午线轮胎的结构

图 3.8 轮胎生产的主要工序流程

1) 工序一：密炼工序

密炼工序就是把炭黑、天然/合成橡胶、油、添加剂、促进剂等原材料混合到一起，在密炼机里进行加工，生产出“胶料”的过程。

轮胎里每一种胶部件所使用的胶料的成分取决于轮胎使用性能的要求。同时，胶料成分的变化还取决于配套厂家以及市场的需求，这些需求主要来自于牵引力、驾驶性能、路面情况以及轮胎自身的要求。所有的胶料在进入下一工序(胶部件准备工序)之前，都要进行测试，被放行以后方可进入下一工序。

2) 工序二：胶部件准备工序

胶部件准备工序包括6个主要工段。在这个工序里，将准备好组成轮胎的所有半成品胶部件，其中有的胶部件是经过初步组装的。这6个工段分别为：

(1) 工段一：挤出。

胶料喂进挤出机头，从而挤出不同的半成品胶部件：胎面、胎侧/子口和三角胶条。

(2) 工段二：压延。

原材料帘线穿过压延机并且帘线的两面都挂上一层较薄的胶料，最后的成品称为“帘

布”。原材料帘线主要是尼龙和聚酯两种。

(3) 工段三：胎圈成型。

胎圈是由许多根钢丝挂胶后缠绕而成的。用于胎圈的这种胶料是有特殊性能的，当硫化完以后，胶料和钢丝能够紧密的贴合到一起。

(4) 工段四：帘布裁断。

在这个工序里，帘布将被裁断成适用的宽度并接好接头。帘布的宽度和角度的变化主要取决于轮胎的规格以及轮胎结构设计的要求。

(5) 工段五：贴三角胶条。

在这个工序里，挤出机挤出的三角胶条将被手工贴合到胎圈上。三角胶条在轮胎的操作性能方面起着重要的作用。

(6) 工段六：带束层成型。

这个工序是生产带束层的。在锭子间里，许多根钢丝通过穿线板出来，再和胶料同时穿过口型板使钢丝两面挂胶。挂胶后带束层被裁断成规定的角度和宽度。宽度和角度大小取决于轮胎规格以及结构设计的要求。

所有的胶部件都将被运送到“轮胎成型”工序，准备轮胎成型时使用。

3) 工序三：轮胎成型工序

轮胎成型工序是把所有的半成品在成型机上组装成生胎，这里的生胎是指没经过硫化。生胎经过检查后，运送到硫化工序。

4) 工序四：硫化工序

生胎被装到硫化机上，在模具里经过适当的时间以及适宜的条件，从而硫化成成品轮胎。硫化完的轮胎即具备了成品轮胎的外观——图案/字体以及胎面花纹。现在，轮胎将被送到最终检验区域了。

5) 工序五：最终检验工序

在这个区域里，轮胎首先要经过目视外观检查，然后是均匀性检测，均匀性检测是通过“均匀性实验机”来完成的。均匀性实验机主要测量径向力、侧向力、锥力以及波动情况。均匀性检测完之后要做动平衡测试，动平衡测试是在“动平衡实验机”上完成的。最后轮胎要经过 X 光检测，然后运送到成品库以备发货。

思考及实践

1. 橡胶和塑料有什么区别？到超市去看看，哪些日用品用的是橡胶？哪些用的是塑料？

2. 试着说出 19 世纪后半叶有哪些重大的科学技术发明和伟大的科学家。

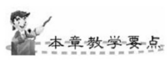
3. 试着阐述一下塑炼、混炼、压延和硫化等四个橡胶加工工艺的作用。

4. 找一个废旧的汽车轮胎，解剖一下看看内部的结构。

5. 有机会到汽车轮胎制造厂去参观一下，看看轮胎是如何制造出来的。

6. 为什么目前乘用车轮胎(轿车、SUV 等)基本都是子午线轮胎？为什么这种轮胎不容易漏气？

第4章 玻璃及加工成型



知识要点	掌握程度	相关知识
玻璃的概念、组成与分类	了解玻璃的概念； 了解玻璃的组成与分类； 掌握玻璃的分类	玻璃的组成与性质； 玻璃的分类
玻璃的生产工艺	掌握玻璃的生产工艺过程； 重点熟悉玻璃的两大成型方法	玻璃的配料、融制和成型
玻璃制品的二次加工	了解玻璃二次加工的概念和方法； 了解汽车挡风玻璃的二次加工过程	玻璃二次加工的概念和方法； 汽车挡风玻璃的二次加工过程

4.1 概 述

玻璃是一种特殊的人工合成材料，广泛应用于我们日常生活的各个方面(图 4.1)。晶莹光洁的表面、均匀的光影过渡，都是玻璃材料带给我们的视觉和心灵感受。



图 4.1 玻璃的用途

玻璃是一种较为透明的固体物质，在熔融时形成连续网络结构，冷却过程中黏度逐渐增大并硬化而不结晶的硅酸盐类非金属材料。普通玻璃的主要成分是二氧化硅。由于玻璃的非晶态结构，其物理性质和力学性质等都是各向同性的。

1. 玻璃的历史

玻璃最初由火山喷出的酸性岩凝固而得。大约公元前 3700 年前，古埃及人已制出玻璃装饰品和简单的玻璃器皿，当时只有有色玻璃。大约公元前 1000 年前，中国制造出无色玻璃。公元 12 世纪，出现了商品玻璃，并开始成为工业材料。18 世纪，为适应研制望远镜的需要，制造出光学玻璃。1873 年，比利时首先制造出平板玻璃。1906 年，美国制造出平板玻璃引上机。此后，随着玻璃生产的工业化和规模化，各种用途和各种性能的玻璃相继问世。如今，玻璃已成为日常生活、工业生产和科学技术领域的重要材料。

2. 玻璃的组成与性质

玻璃是由石英砂、纯碱、长石及石灰石经高温制成的。除此之外，生产玻璃的辅助原料还有澄清剂、着色剂、脱色剂、乳浊剂、助熔剂。

玻璃的基本性质有：

（1）密度：普通玻璃密度为2.5～2.6g/m^2，属于致密材料。

（2）光学性质：光线射入分透射、吸收和反射。可用透射比、吸收比、反射比来表示玻璃的光学性能，各比的总和为1。对于建筑玻璃而言，如果为了采光，照明玻璃需要透射比较高；用于遮光，需要反射比较高；用于隔热要用吸收比较高性能的玻璃。

（3）热工性能：与化学组成有关，导热系数一般为0.75～0.92W/(m·k)，玻璃的抗热压力强度远高于抗冷拉力，这就是冬季玻璃易冻裂的原因。

（4）力学性能：抗压程度高，可达600～1200MPa，抗拉强度很小，约40～80MPa，这就是冲击力下易碎的原因，典型的脆性材料。

（5）化学稳定性：通常对酸碱盐有抗性，但却不能长期耐腐蚀。

3. 玻璃的分类

玻璃的种类有很多，各种玻璃的性能有很大的差别。一般通过改变玻璃的成分及工艺条件，可使玻璃的性能有很大的变化。一般来说，玻璃可以分为如下四类：

1）平板玻璃

平板玻璃是指未经其他加工的平板状玻璃制品，也称白片玻璃或净片玻璃。按生产方法不同，可分为普通平板玻璃和浮法玻璃。平板玻璃是建筑玻璃中生产量最大、使用最多的一种，主要用于门窗，起采光、围护、保温、隔声等作用，也是进一步加工成其他技术玻璃的原片。

2）安全玻璃

安全玻璃是指与普通玻璃相比，具有力学强度高、抗冲击能力强的玻璃。其主要品种有钢化玻璃、夹丝玻璃、夹层玻璃和钛化玻璃。安全玻璃被击碎时，其碎片不会伤人，并兼具有防盗、防火的功能。

平面钢化玻璃常用作建筑物的门窗、隔墙、幕墙及橱窗、家具等，曲面玻璃常用于汽车、火车及飞机等方面。钢化玻璃一般不能切割、磨削，边角不能碰击挤压，需按现成的尺寸规格选用或提出具体设计图纸进行加工定制。

夹丝玻璃也称防碎玻璃或钢丝玻璃。它由压延法生产，即在玻璃熔融状态下将经预热处理的钢丝或钢丝网压入玻璃中间，经退火、切割而成。夹丝玻璃表面可以是压花的或磨光的，颜色可以制成无色透明或彩色。特点是安全性和防火性好。由于钢丝网的骨架作用，不仅提高了玻璃的强度，而且受到冲击或温度骤变而破坏时，碎片不会飞散，避免了对人的伤害。在出现火情时，火焰蔓延，夹丝玻璃受热炸裂，由于金属丝网的作用，玻璃仍能保持固定，隔绝火焰，故又称为防火玻璃。可用于建筑的门窗、天窗、采光屋顶（图4.2）、阳台等部位。

夹层玻璃是在两片或多片玻璃原片之间，用PVB树脂胶片，经过加热、加压黏合而成的平面或曲面的复合玻璃制品。用于夹层玻璃的原片可是普通平板玻璃、浮法玻璃、钢化玻璃、彩色玻璃、吸热玻璃或热反射玻璃等。夹层玻璃的透明性好，抗冲击性能高，用多层普通玻璃或钢化玻璃复合起来，可制成防弹玻璃（图4.3）。由于PVB胶片的黏合作用，玻璃即使破碎时，不会伤人。通过采用不同的原片玻璃，夹层玻璃还可具有耐久、耐热、耐湿等性能。夹层玻璃有较高的安全性，一般在建筑上用作高层建筑门窗、天窗和商店、银行、珠宝的橱窗、隔断等。

防弹玻璃实际上是夹层玻璃的一种，只是构成的玻璃多采用强度较高的钢化玻璃，而且夹层的数量也相对较多。多采用于银行或者豪宅等对安全要求非常高的装修工程中。



图 4.2　世博会“阳光谷”



图 4.3　防弹玻璃试验

3）节能型玻璃

传统玻璃应用在建筑物上主要是采光，随着建筑物门窗尺寸加大，人们对门窗保温隔热要求也相应提高，节能装饰型玻璃是集节能性和装饰性于一体的玻璃。

节能装饰型玻璃通常有美丽的外观色彩，且还有特殊的对光和热的吸收、透射和反射能力。用于建筑物的外墙窗玻璃幕墙，能起到显著节能效果，现已广泛应用于各种高级建筑物上。建筑上常用的有吸热玻璃、热反射玻璃和中空玻璃等。

吸热玻璃是指能吸收大量红外线辐射又保持良好可见光透过率的平板玻璃。其制备方法是，在玻璃中加入着色氧化物使玻璃带色并具有较高的吸热性能(本体着色玻璃)；或在玻璃表面喷涂有色氧化物薄膜而制成。

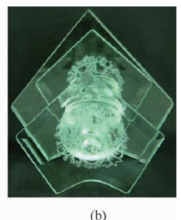
热反射玻璃是指有较高的热反射能力而又保持良好透光性的平板玻璃。也称镜面玻璃，有金色、茶色、灰色、紫色、褐色、青铜色和浅蓝等各色。热反射玻璃的热反射率高，镀金属膜的热反射玻璃还有单向透像的作用。

4）其他玻璃

其他玻璃有磨砂玻璃、喷砂玻璃(图 4.4)、钛化玻璃、变色玻璃、压花玻璃五种。



(a)



(b)

图 4.4　喷砂玻璃

磨砂玻璃(图 4.5)是在普通平板玻璃上面再磨砂加工而成。一般厚度在 9 厘以下，以 5 厘、6 厘厚度居多。喷砂玻璃性能基本上与磨砂玻璃相似，不同的是改磨砂为喷砂。由于两者视觉上类同，很多业主，甚至装修专业人员都把它们混为一谈。

磨砂玻璃是生产出来就成型的沙感，质感强但是图案有限，喷砂玻璃是按照要求先用纸刻好模再喷出图案，这样就想要什么图形都可以现刻了。




(a) (b)

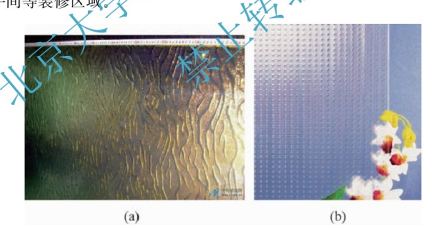
图 4.5 磨砂玻璃

钛化玻璃也称永不碎铁甲箔膜玻璃，具有高抗碎能力，高防热及防紫外线等功能。

不同的基材玻璃与不同的钛金箔膜，可组合成不同色泽、不同性能、不同规格的钛化玻璃。钛化玻璃常见的颜色有：无色透明、茶色、茶色反光、铜色反光等。

变色玻璃：能够对阳光起反射作用。建筑物装上这种玻璃，从室内看外面很清楚，从外面看室内却什么也瞧不见。变色玻璃还会随着阳光的强弱而改变颜色的深浅，调节室内的光线。所以人们把这种玻璃叫做“自动窗帘”。

压花玻璃是采用压延方法制造的一种平板玻璃(图4.6)。其最大的特点是透光不透明，一般用于洗手间等装修区域。



(a) (b)

图 4.6 变色玻璃和压花玻璃

4.2 玻璃的生产工艺

玻璃的生产工艺视制品的种类而异，但其过程基本上主要分为配料、熔制和成型三个阶段，一般采用连续性的工艺(图4.7)。

1. 配料

按照设计好的料方单，将各种原料称量后在一混料机内混合均匀。玻璃的主要原料有

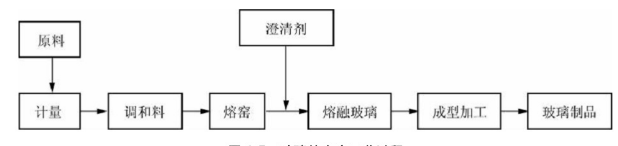


图 4.7 玻璃的生产工艺过程

石英砂、石灰石、长石、纯碱、硼酸等。

2. 熔制

熔制是将配好的原料经过高温加热，形成均匀的无气泡的玻璃液。这是一个很复杂的物理、化学反应过程。玻璃的熔制在熔窑内进行。熔窑主要有两种类型：一种是坩埚窑，玻璃料盛在坩埚内，在坩埚外面加热。小的坩埚窑只放一个坩埚，大的可多到 20 个坩埚。坩埚窑是间隙式生产的，现在仅有光学玻璃和颜色玻璃采用坩埚窑生产。另一种是池窑，玻璃料在窑池内熔制，明火在玻璃液面上部加热。玻璃的熔制温度大多在 1300～1600℃。大多数用火焰加热，也有少量用电流加热的，称为电熔窑。

3. 成型

将熔制好的玻璃液转变成具有固定形状的固体制品。成型必须在一定温度范围内才能进行，这是一个冷却过程，玻璃首先由黏性液态转变为可塑态，再转变成脆性固态。成型方法可分为人工成型和机械成型两大类。

人工成型又包括吹制、拉制、压制、自由成型等四种。吹制是用一根镍铬合金吹管，挑一团玻璃在模具中边转边吹，主要用来成型玻璃泡、瓶、球(划眼镜片用)等，如图 4.8 所示。拉制是在吹成小泡后，另一工人用顶盘黏住，二人边吹边拉主要用来制造玻璃管或棒。压制是挑一团玻璃，用剪刀剪下使它掉入凹模中，再用凸模一压，主要用来成型杯、盘等。自由成型是挑料后用钳子、剪刀、镊子等工具直接制成工艺品。

因为人工成型劳动强度大，温度高，条件差，所以，除自由成型外，大部分已被机械成型所取代。机械成型有压制、吹制(图 4.9)、拉制、压延、浇铸、离心浇铸、烧结等多种。

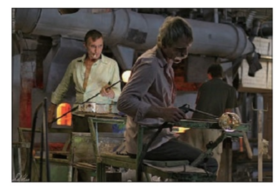


图 4.8 人工吹制法



图 4.9 机械吹制法

压延法用来生产厚的平板玻璃、刻花玻璃、夹金属丝玻璃等。浇铸法主要用于生产光

学玻璃。离心浇铸法，用于制造大直径的玻璃管、器皿和大容量的反应锅。这是将玻璃熔体注入高速旋转的模子中，由于离心力使玻璃紧贴到模子壁上，旋转继续进行直到玻璃硬化为止。烧结法用于生产泡沫玻璃。它是在玻璃粉末中加入发泡剂，在有盖的金属模具中加热，玻璃在加热过程中形成很多闭口气泡，这是一种很好的绝热、隔音材料。

浮法玻璃是平板玻璃的一种，因生产过程是“漂浮”在锡液面上而得名。平板玻璃生产工艺有垂直引上工艺(处于淘汰边缘)、平拉工艺(如压花玻璃)、浮法工艺(图4.10)，浮法工艺是世界上目前最先进的平板玻璃生产工艺方法。以汽车工业为例，用于汽车玻璃的浮法玻璃原片厚度一般有2mm、3mm、3.5mm、4mm、5mm、6mm。浮法玻璃成分主要有：SiO_2、CaO、MgO、Al_2O_3、Na_2O，可以用“高钙、中镁、低铝、微铁”来描述成分的特点。浮法玻璃有透明玻璃(俗称白玻)和颜色玻璃。颜色玻璃有蓝玻、绿玻、灰玻、茶玻、黑玻等多种。颜色玻璃是在透明玻璃的原料中加入着色剂而制成，如蓝玻是加入了CoO，绿玻是加入了Fe_2O_3。

浮法玻璃生产过程一般为：将经过合理调配的原料送入高温(1050～1150 ℃)的玻璃熔窑获得均匀的玻璃液，再将玻璃液送入充满氮氢保护气体的锡槽，漂浮在锡液表面上，自然摊平、展薄、抛光、冷却，最后进入退火窑，经退火后的玻璃产品即为浮法玻璃。同锡液接触的玻璃表面称为锡面，自然摊平的另一面称为空气面。空气面比锡面具有更好的性能和更高的表面质量。

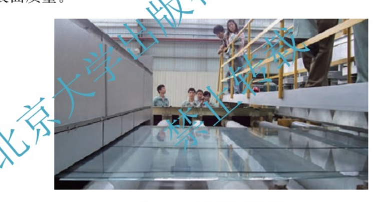


图4.10 浮法玻璃生产

4. 退火和淬火

通俗地讲，退火就是先加热再缓慢冷却。玻璃在成型过程中经受了激烈的温度变化和形状变化，这种变化在玻璃中留下了热应力。这种热应力会降低玻璃制品的强度和热稳定性。如果直接冷却，很可能在冷却过程中或以后的存放、运输和使用过程中自行破裂(俗称玻璃的冷爆)。为了消除冷爆现象，玻璃制品在成型后必须进行退火。退火就是在某一温度范围内保温或缓慢降温一段时间以消除或减小玻璃中的热应力到允许值。

此外，某些玻璃制品为了增加其强度，可进行钢化处理。包括：物理钢化(淬火)，用于较厚的玻璃杯、桌面玻璃、汽车挡风玻璃等；和化学钢化(离子交换)，用于手表表蒙玻璃、航空玻璃等。淬火就是使玻璃表面形成一个有规律、均匀分布的压力层，以提高玻璃制品的机械强度和热稳定性，通俗地讲，淬火就是先加热再快速冷却。

4.3 玻璃制品的二次加工

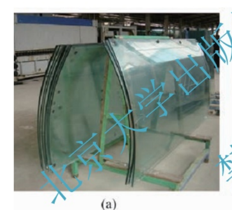
玻璃制品的二次加工又称为玻璃深加工，它是利用一次成型的平板玻璃为基本原料，根据使用要求，采用不同的加工工艺制成的具有特定功能的玻璃产品。可分为冷加工、热加工和表面处理三大类。

冷加工是指在常温下通过机械方法来改变玻璃制品的外形和表面状态所进行的工艺过程。冷加工的基本方法包括研磨、抛光、切割、喷砂、钻孔和车削等。

有很多形状复杂和要求特殊的玻璃制品，需要通过热加工进行最后成型。此外，热加工还用来改善制品的性能和外观质量。热加工的方法主要有火焰切割、火抛光、钻孔、锋利边缘的烧口等。

表面处理包括玻璃制品的光滑面与散光面的形成(如器皿玻璃的化学刻蚀、灯泡的毛蚀、玻璃化学抛光等)，表面着色、表面涂层(如镜子镀银、表面导电)。

下面以汽车风窗夹层玻璃(图 4.11)的深加工为例，来说明玻璃制品的二次加工过程。


(a)



(b)

图 4.11 汽车风窗夹层玻璃

(1) 原片切割。

将原片切成所需尺寸的毛坯，毛坯留边量通常为单边不少于 12～15mm，以利于四周的掰边。

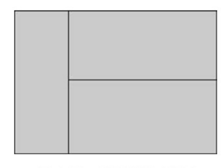


图 4.12 原片切割示意图

(2) 预处理。

预处理包括开刀口、掰边、磨边和洗涤等步骤。

掰边是去除边部多余的边料，由于切割时刀口没有通到玻璃边部，所以掰边前要先开刀口。

磨边是将周边锋锐的棱角磨去，不割手，也去除一些细小的裂纹。一般采用金刚砂磨轮进行磨边，磨轮截面形状有 V 形和 U 形两种，V 形用于磨倒角边，U 形用于磨圆边。

洗涤是用水将玻璃表面灰尘、油污、杂质清理干净。洗涤夹层玻璃严格来讲要使用去离子水，因为水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子会在玻璃上造成水迹，同时也会影响玻璃的 PVB 的黏结力。去离子水程度可用水的电导率来衡量，电导率越小，水越纯。

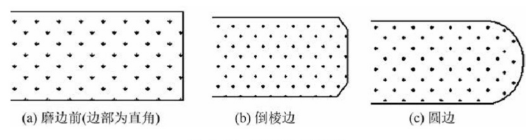


图 4.13 玻璃加工预处理

(3) 丝印。

丝印和烘干的目的是用丝网印刷方法将油墨印刷在玻璃上并将油墨烘干。在丝印之前，需要增进行喷粉，即：把玻璃经洗涤干燥后，在外片玻璃表面喷上分隔粉，防止两片玻璃叠合热弯时烧结在一起。

(4) 热弯。

把切割好尺寸大小的玻璃，放置在根据弯曲弧度设计的模具上，放入加热炉中，加热到软化温度，使玻璃软化，然后退火，即可制成热弯玻璃。热弯模具采用耐热钢材制成，其上部环沿与玻璃成品形状及曲率一致。由于热弯过程是决定玻璃的最终形状，因此是整个夹层玻璃生产的关键工序。

(5) 合片。

在两片玻璃中间夹上膜片并把膜片边料修掉。在正式合片之前，还应进行清粉、拉膜、切膜、调湿等工作。

清粉的目的是把玻璃之间的分隔粉用吸尘器或清水清理干净。而拉膜则是将膜片拉深成所需要的弧度。膜片的切割(切膜)长度为玻璃实际长度加上 20～40mm，切割好的 PVB 应叠放整齐，并用高压膜包好，以防止膜片变色、污染。调湿是指 PVB 膜片在使用前均必须在室内调节含水率，以使膜片含水率符合要求，即膜片含水率在 0.3%～0.7%。PVB 膜片的含水率越大，它和玻璃间的黏接力就越小，PVB 膜片含水率越低，黏接力越强，其抗穿透性就越小。

(6) 高温高压。

目的是在高温高压下把玻璃与 PVB 紧密黏接在一起。

(7) 终检、修边。

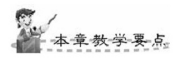
检验玻璃外观后将边部 PVB 用小刀割除。

(8) 包装。

思考及实践

1. 生活中有哪些常见的玻璃制品？建议去超市和建材市场做个统计。
2. 玻璃的主要成分是什么？各成分有什么作用？自己查资料回答。
3. 平板玻璃的生产一般有哪几道工艺？
4. 如果有机会，到眼镜店看看球形玻璃是如何加工成眼镜镜片的？
5. 汽车风窗玻璃的加工需要哪些工艺步骤？建议有机会到企业参观学习。

第5章 陶瓷及加工成型



知识要点	掌握程度	相关知识
陶瓷的概念、分类和发展史	掌握传统陶瓷和现代陶瓷的概念； 了解陶瓷的种类； 了解中国陶瓷的发展和地位	利用精密锻造和闭塞式锻造实施条件及工艺特征； 典型构件的成型优势
粉体的制备与合成	了解陶瓷粉体的制备6方法。	粉碎法和合成法
陶瓷成型技术	熟悉注射成型法； 了解注浆成型法、可塑成型法。	注浆成型法、可塑成型法、注射成型法
陶瓷材料的工程应用	了解陶瓷材料的工程应用	陶瓷材料在刀具、轴承、密封件和医学工程中的应用

5.1 概　　述

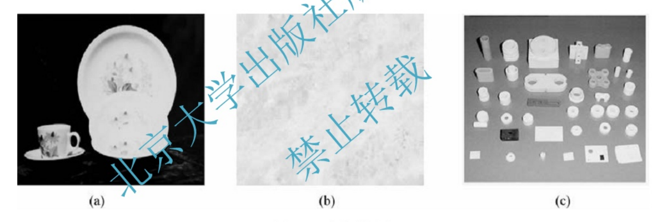
当你参观故宫博物院或长沙马王堆的时候，一定都会流连惊叹于伟大祖国五千年的灿烂文明和祖先的智慧。但是，自豪之余，千万记住，现在是21世纪，人类文明已经跨入了一个全新的时空。陶瓷早已不仅仅指那些漂亮的工艺品和餐具，而已经在机械、建筑、电子、航空航天等领域发挥重要的作用。

1. 陶瓷的概念

陶瓷、金属、高分子材料并列为当代三大固体材料。从化学的角度来看，三者之间的主要区别在于化学键不同。金属键是使金属原子结合成金属晶体的化学键。高分子材料的化学键有共价键和范德华键，陶瓷的化学键则包括离子键和共价键。

传统上，“陶瓷”是指所有以黏土为主要原料与其他天然矿物原料经过粉碎、混炼、成型、烧结等过程而制成的各种制品。

传统陶瓷包括常见的日用陶瓷制品和建筑陶瓷、电瓷等，如图5.1所示。



(a)　(b)　(c)

图5.1　陶瓷的用途

而从广义上看，陶瓷是指用陶瓷生产方法制造的无机非金属固体材料和制品的统称。美国陶瓷协会的定义是：陶瓷(Ceramics)是包括各种硅酸盐材料和制品在内的无机非金属材料的统称，不仅指陶瓷，还包括水泥、玻璃、搪瓷等材料。

传统陶瓷的主要原料为取之于自然界的硅酸盐矿物(如黏土、长石、硅砂等，如图5.2所示)，所以传统陶瓷可归属于硅酸盐类材料和制品。因此，陶瓷工业可与玻璃、水泥、搪瓷、耐火材料等工业同属“硅酸盐工业”的范畴。

现代陶瓷，又称精细陶瓷、特种陶瓷或高性陶瓷，按其应用功能分类，大体可分为高强度、耐高温和复合结构陶瓷及电工电子功能陶瓷两大类(图5.3)。在陶瓷坯料中加入特别配方的无机材料，经过1360°左右高温烧结成型，从而获得稳定可靠的防静电性能，成为一种新型特种陶瓷，通常具有一种或多种功能，如电、磁、光、热、声、化学、生物等功能；以及耦合功能，如压电、热电、电光、声光、磁光等功能。

氧化物陶瓷、压电陶瓷、金属陶瓷等的生产过程基本上还是原料处理、成型、烧结这种传统的陶瓷生产方法，但原料已不再使用或很少使用黏土等传统陶瓷原料，而已扩大到化工原料和合成矿物，甚至是非硅酸盐、非氧化物原料，组成范围也延伸到无机非金属材


(a) 粘土矿物—高岭石


(b) 钾长石


(c) 硅砂(石英)

图 5.2 陶瓷的主要原料


(a) 氧化锆陶瓷


(b) 超声波雾化器

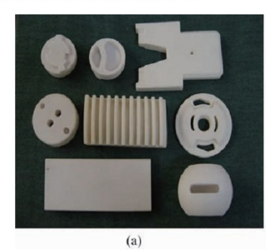

(c) 金属陶瓷阀门

图 5.3 现代陶瓷

料的范围中，并且出现了许多新的工艺。

2. 陶瓷的分类

按陶瓷概念和用途来分类，陶瓷可以分为普通陶瓷和特种陶瓷两大类。其中普通陶瓷又包括日用陶瓷、建筑卫生陶瓷、化工陶瓷、化学瓷、电瓷及其他工业陶瓷；特种陶瓷可分为结构陶瓷和功能陶瓷(图 5.4)。


(a)

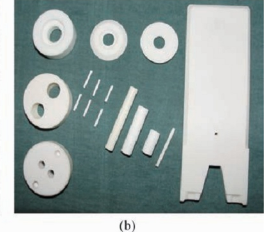
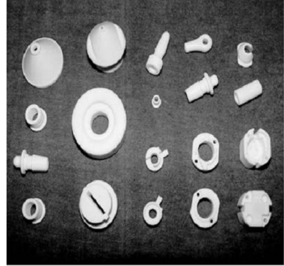

(b)

图 5.4 不同形状的特种结构陶瓷件

结构陶瓷是作为结构部件的特种陶瓷。由单一或复合的氧化物或非氧化物组成，主要是指发挥其机械、热、化学等性能的一大类新型陶瓷材料。用于耐磨损、高强度、耐热、

耐热冲击、硬质、高刚性、低热膨胀性和隔热等结构陶瓷材料。

功能陶瓷是指在电、磁、声、光、热、生物-化学等方面具备的许多优异性能的陶瓷。在自动控制、仪器仪表、电子、通信、能源、交通、冶金、化工、精密机械、航空航天、国防等行业均发挥着重要作用。部分功能陶瓷器件如图5.5所示。



(a) 电子绝缘件



(b) 氧化锆陶瓷光学导管

图5.5 功能陶瓷器件

普通陶瓷以天然黏土为原料，混料成型，烧结而成，而工程陶瓷由高纯、超细的人工合成材料，精确控制化学组成。如氮化硅、碳化硅、氧化铝、氧化锆、氮化硼、氧化锆增韧陶瓷(ZTC)等。

工程陶瓷的性能有：耐高温、耐磨、耐腐蚀、绝缘、抗蠕变性能好；硬度高，弹性模量高，塑性韧性比金属差得多；对缺陷很敏感；强度可靠性差。

3. 中国陶瓷的历史

中国陶瓷的制作，从八千年以前的新石器时代，就已经开始了。虽然瓷器的发明时间较晚，但其出现，无疑是前人累积丰富制陶经验后所获得的丰硕成果。一部中国陶瓷发展史中的点点滴滴，无不说明中华民族是一个具有智慧与创造力的民族。而瓷器的发明，更在世界上享有极其崇高的地位，博得了“瓷国”(China)专有的称号。“China”意为“中国”；“china”意为“瓷器”。

我国的陶瓷发展经历了三个阶段：陶器、原始瓷器(过渡阶段)、瓷器，取得三个重大突破，分别是原料的选择和精制、窑炉的改进和烧成温度的提高，以及釉的发现和使用。

近30年来，我国的特种陶瓷技术也获得了飞速发展。在机械加工领域，山东大学艾兴院士领导的研究团队，先后研制成功六个品种、十二个牌号的新型氧化铝基陶瓷刀具，填补了国内空白，其中三种为国内外首创，为高速切削金属材料及难加工材料提供了较理想的刀具材料。如晶须与颗粒协同增韧补强的JX-2陶瓷刀具加工电铸纯镍件，提高刀具寿命几十倍，被誉为“神刀”。在光纤传导领域，氧化锆陶瓷插芯及套筒是光纤活动连接器中的核心部件。2000年以前，国际上只有京瓷(Kyocera)、东陶(Toto)等几家日本公司掌握氧化锆陶瓷插芯及套筒的完整生产技术，一直未向我国转让氧化锆陶瓷套筒技术。深圳市爱尔创科技有限公司和清华大学新型陶瓷及精细工艺国家重点实验室经过多年的研

制，已掌握了从氧化锆粉体到精密加工的陶瓷套筒全套生产技术，产品已大部分取代进口产品，现在国产陶瓷套筒已形成了月产 1500 万只以上的生产能力，成为最大的陶瓷套筒生产国。在医学领域，我国自主研发的氧化锆瓷，已经打破国外垄断，为降低治疗成本和患者负担创造条件。

5.2　粉体的制备与合成

粉体(Powder)，就是大量固体粒子的集合系。它表示物质的一种存在状态，既不同于气体、液体，也不完全同于固体。粒径是粉体最重要的物理性能，对粉体的比表面积、可压缩性、流动性和工艺性能有重要影响。粉体的制备方法一般可分为粉碎法和合成法两种。

1. 机械法制备粉体

机械法制备粉体的主要方法为机械冲击式粉碎(破碎)：采用的设备有颚式破碎机、圆锥破碎机和锤式破碎机等。主要用于块状料的前级处理。设备结构简单，操作方便，产量高。其他机械式制备粉体的方法有：球磨粉碎法、行星式研磨法和振动粉碎法。

2. 化学法合成粉体

化学法合成粉体有固相法、液相法和气相法三种。

液相法是目前实验室和工业上最为广泛的合成超微粉体材料的方法。与固相法比较，液相法可以在反应过程中利用多种精制手段，另外，通过所得到的超微沉淀物，很容易制取各种反应活性好的超微粉体材料。

液相法制备超微粉体材料可简单地分为物理法和化学法两大类。

物理法是从水溶液中迅速析出金属盐，一般是将溶解度高的盐的水溶液雾化成小液滴，使液滴中的盐类呈球状迅速析出，然后将这些微细的粉末状盐类加热分解，即得到氧化物超微粉体材料。

化学法是通过溶液中反应生成沉淀，通常是使溶液通过加水分解或离子反应生成沉淀物，如氢氧化物、草酸盐、碳酸盐、氧化物、氮化物等，将沉淀加热分解后，可制成超微粉体材料。

而气相制粉法有两种：一种是系统中不发生化学反应的蒸发-凝聚法(PVD)；另一种是气相化学反应法(CVD)。

蒸发-凝聚法是将原料加热至高温(用电弧或等离子流等加热)，使之汽化，接着在具有很大温度梯度的环境中急冷，凝聚成微粒状物料的方法。这一过程不伴随化学反应。采用这种方法能制得颗粒直径在 5～100nm 的微粉，适于制备单一氧化物、复合氧化物、碳化物或金属的微粉。

气相化学反应法是将挥发性金属化合物的蒸气通过化学反应合成所需物质的方法。气相反应法除适用于制备氧化物外，还适用于制备液相法难以直接合成的金属、氮化物、碳化物、硼化物等非氧化物。制备容易、蒸气压高、反应性较强的金属氯化物常用作气相化学反应的原料。

5.3 陶瓷成型技术

陶瓷的成型技术对于制品的性能具有重要影响。新型陶瓷成型方法的选择，应当根据制品的性能要求、形状、尺寸、产量和经济效益等综合确定。

成型方法有注浆成型法、可塑成型法、注射成型法等多种。

1. 注浆成型

注浆成型工艺简单，适于生产一些形状复杂且不规则、外观尺寸要求不严格、壁薄及大型厚胎的制品。

2. 可塑成型法

可塑成型主要是通过胶态原料制备、加工，从而获得一定形状的陶瓷坯体。

可塑成型是古老的一种成型方法。我国古代采用的手工拉坯就是最原始的可塑法。常用的可塑成型方法主要是挤压成型、热压铸成型、胶态成型等。

3. 注射成型

对于尺寸精度高、复杂形状陶瓷制品的大批量生产来说，陶瓷的注射成型(Ceramic injection molding，CIM) 有着显著的优势，它可一次性成型复杂形状制品，产品尺寸精度高，无需机械加工或只需微量加工，易于实现生产自动化且产品性能优异。

陶瓷注射成型技术(CIM)是在聚合物注射成型技术比较成熟的基础上发展而来的，是当今国际上发展最快、应用最广的陶瓷零部件精密制造技术。

CIM 成型的制造过程如图 5.6 所示，主要包括 4 个环节：①注射喂料的制备，将合适的有机载体(具有不同性质和功能的有机物) 与陶瓷粉末在一定温度下混炼、干燥、造粒，得到注射用喂料；②注射成型，混炼后的注射混合料在注射成型机内被加热转变为黏稠性熔体，在一定的温度和压力下高速注入金属模具内，冷却固化为所需形状的坯体，然后脱模；③脱脂，通过加热或其他物理化学方法，将注射成型坯体内的有机物排除；④烧结，脱脂后的陶瓷素坯在高温下致密化烧结，获得所需外观形状、尺寸精度和显微结构的致密陶瓷部件。

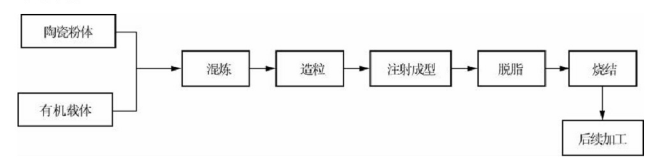


图 5.6 CIM 成型的制造过程

5.4 陶瓷材料的工程应用

1. 陶瓷刀具

在金属材料机械加工中，刀具材料的性能对切削加工效率、精度、表面质量、刀具寿命有着决定性的影响。在现代切削加工中，陶瓷刀具材料以其优异的耐热性、耐磨性和化学稳定性，在高速切削领域和切削难加工材料方面扮演着越来越重要的角色。陶瓷刀具材料主要包括氧化铝、氮化硅及赛隆系列。其他陶瓷材料，如氧化锆、硼化钛陶瓷等作为刀具材料也有使用。

2. 陶瓷轴承

传统的轴承多采用金属制成，以油作为润滑介质，但在使用中有许多缺点，如不适用于高温、高速、有化学腐蚀的场合，油润滑易泄漏污染环境等。采用陶瓷材料制造轴承可以弥补金属轴承的不足。例如，Si_3N_4 以其优良的性能成为制造陶瓷滚动轴承的首选材料，已经在高速车床、航空航天发动机、化工机械和设备等许多领域得到了应用。

3. 陶瓷密封件

采用浇注、热压、干压等成型工艺，制作而成的95、99氧化铝陶瓷密封件，可镜面抛光加工，精度可达±0.01，机械强度高、高温耐磨性能好、耐化学腐蚀性能强、气密性好，温度突变时不透水，用于各种家用水泵、农用泵及其他化工泵的机械密封及运动密封，很好地满足滑动性能和密封性能两方面在实际使用环境下的要求。广泛用于冶金、机械、化工、医药、食品、耐腐蚀泵、汽车、气动元件等行业机械密封部件。

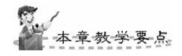
4. 人工陶瓷骨骼

人工陶瓷骨骼是一种生物陶瓷，能够满足生物相容性、力学相容性、与生物物质的优异的亲和性、抗血栓等生物学要求。从20世纪70年代开始，美国、日本等发达国家就已经开始用氧化铝生物陶瓷制备股骨头的研究，如今，高密度、高纯度、多晶氧化铝已大量用于制作人工髋关节的股骨干、股骨头和髋臼部件。

思考及实践

1. 一般而言，如何辨别一个制品是陶瓷还是玻璃？
2. 到博物馆去看看，思考一下那些复杂的陶瓷古董是如何生成出来的？
3. 陶瓷成型的工艺有哪几种，各自的工艺流程及特点是什么？
4. 陶瓷材料在工程上有哪些应用？
5. 自己查资料或者咨询骨科(牙科)大夫，了解人工陶瓷骨骼(牙齿)的发展现状。

第6章 金属材料与热处理



知识要点	掌握程度	相关知识
金属的用途	了解金属材料在工业和日常生活中的用途	金属材料在工业和日常生活中的用途
金属的力学性能	掌握强度、塑性、硬度、冲击韧度及疲劳强度等概念； 了解强度、塑性、硬度、冲击韧度及疲劳强度的计算和测试方法	强度、塑性、硬度、冲击韧度及疲劳强度等概念； 强度、塑性、硬度、冲击韧度及疲劳强度的计算和测试方法
常用金属材料	熟悉钢、铸铁、有色金属及其合金的成分、牌号和性能； 了解金属材料的实用鉴别方法	钢、铸铁、有色金属及其合金的成分、牌号和性能； 金属材料的实用鉴别方法
金属热处理	重点掌握金属普通热处理：退火、正火、淬火、回火； 了解金属表面处理	退火、正火、淬火、回火的工艺过程和应用； 表面淬火和化学热处理的工艺和应用

金属材料是机械工程中应用最普遍的材料，包括钢铁金属(各种钢材、铸铁)、非铁金属(铜、铝、锌、镁等及其合金)两大类。金属材料来源丰富，使用性能优良，容易加工，所以常用来制造机械设备、工具、模具，以及各种工程结构件。金属材料的加工方法众多，既有铸造、锻造、焊接等热加工，也有切削加工等冷加工。从这一章开始，我们先领略金属材料世界的精彩，然后，了解各种铿锵有力的金属加工方法。

6.1 金属的用途

在钢、铁和合金为代表的现代工业社会，金属材料以其优良的力学性能、加工性能和独特的表面特性，成为现代产品设计中的一大主流材质，无论是汽车、轮船、火车、飞机降落架，还是高楼大厦、高架桥等建筑，都大量使用性能各异的金属(图 6.1)。



图 6.1 金属材料的工业应用

而在日常生活中，金属制品也是无处不在(图 6.2)，尽管塑料出现之后，曾经对金属日用品造成了一定的冲击，但是金属制品由于具有健康和耐用等特性，重新受到人们的青睐，特别是不锈钢的家具和餐具更能提升生活的档次。

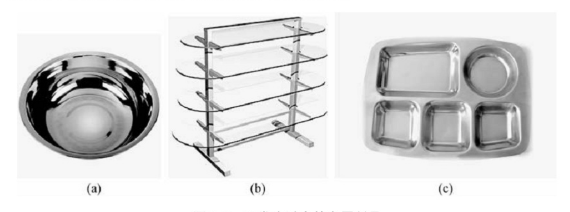


图 6.2 日常生活中的金属制品

6.2 金属的力学性能

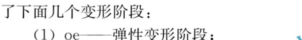
材料的力学性能是指材料在外力作用下所表现出来的特性。金属材料的力学性能包括强度、塑性、硬度、冲击韧度及疲劳强度等。

1. 强度

强度是指金属材料在载荷作用下抵抗变形和破坏的能力。

强度指标一般可以通过金属拉深试验来测定。把标准试样装夹在试验机上，然后对试样缓慢施加拉力，使之不断变形直到拉断为止。在此过程中，试验机能自动绘制出载荷 F 和试样变形量 ΔL 的关系曲线。此曲线叫做拉深曲线。图 6.3 为低碳钢的拉深曲线，图中纵坐标表示载荷，单位为 N；横坐标表示绝对伸长量 ΔL，单位为 mm。

从图中可以看出低碳钢拉深过程中，经历了下面几个变形阶段：



（1）oe——弹性变形阶段；

（2）es——屈服阶段；

（3）sb——强化阶段；

（4）bk——缩颈阶段。

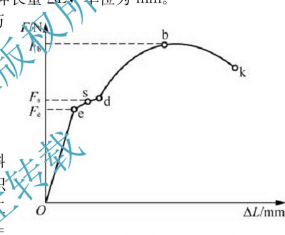


图 6.3 低碳钢的拉深曲线

材料受到外力作用会发生变形，同时在材料内部产生一个抵抗变形的力称为内力。单位面积上的内力称为应力，单位为 Pa(帕)，即 N/m^2，工程上常用 MPa(兆帕)，1MPa＝10^6 Pa，或 1Pa＝1N/m^2，或 1MPa＝1N/mm^2。

（1）屈服点 σ_s：材料产生屈服时的最小应力。单位为 MPa。

$$\sigma_s = F_s / A_O \tag{2-1}$$

式中，F_s是屈服时的最小载荷(N)；A_O是试样原始截面积。

对于无明显屈服现象的金属材料(如高碳钢、铸铁)，测量屈服点很困难，工程上经常采用残余伸长为 0.2%原长时的应力 $\sigma_{0.2}$作为屈服强度指标，称为规定残余伸长应力。

$$\sigma_{0.2} = F_{0.2} / A_O \tag{2-2}$$

（2）抗拉强度 σ_b：材料在拉断前所承受的最大应力，单位为 MPa。抗拉强度表示材料抵抗均匀塑性变形的最大能力，也是设计机械零件和选材的主要依据。

$$\sigma_b = F_b / A_O \tag{2-3}$$

式中，F_b 是试样断裂前所承受的最大载荷(N)。

2. 塑性

金属材料在载荷的作用下，产生塑性变形而不断裂的能力称为塑性。通过拉深试验测得的常用塑性指标有断后伸长率和断面收缩率。断后伸长率是指试样拉断后的标距伸长量和原始标距之比。

$$\delta = (L_1 - L_0) / L_0 \times 100\% \tag{2-4}$$

式中，L_1为试样原始标距长度。L_0为试样拉断后的标距长度。

断面收缩率是指在试样拉断处，横截面积的缩减量与原始横截面积之比。

$$\psi = (A_0 - A_1)/A_0 \times 100\% \qquad (2\text{-}5)$$

式中，A_0是试样的原始横截面积；A_1是试样断口处的横截面积。

3. 硬度

硬度是指材料表面抵抗局部塑性变形、压痕或划痕的能力。常用来测定硬度的方法有布氏硬度试验法和洛氏硬度试验法。

如图 6.4 所示采用直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球，在规定载荷 F 的作用下，压入被测金属表面，保持一定时间后卸除载荷，测定压痕直径，求出压痕球形的表面积，压痕单位表面积上所承受的平均压力(F/A)即为布氏硬度值，压头为淬火钢球时用 HBS 表示，压头为硬质合金球用时 HBW 表示，如 120HBS，450HBW。

洛氏硬度试验法则是采用顶角为 120°的金刚石圆锥体或直径为 1.588mm 的淬火钢球作为压头，如图 6.5 所示。试验时先施加初载荷，使压头与试样表面接触良好，保证测量准确，再施加主载荷，保持到规定的时间后再卸除主载荷，依据压痕的深度来确定材料的硬度值。

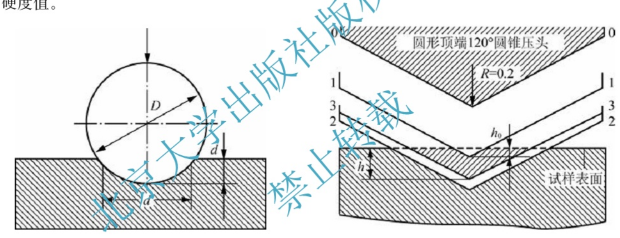


图 6.4 布氏硬度试验法　　图 6.5 洛氏硬度试验法

4. 冲击韧度

对于承受冲击载荷的材料，如汽车发动机中的活塞，不仅要求具有高的强度和一定的塑性，还必须具备足够的冲击韧度。金属材料抵抗冲击载荷作用而不被破坏的能力称为冲击韧度。

冲击韧度的测定方法，如图 6.6 所示。是将被测材料制成标准缺口试样，在冲击试验机上由置于一定高度的重锤自由落下而一次冲断。冲断试样所消耗的能量称为冲击功，其数值为重锤冲断试样的势能差。冲击韧度值就是试样缺口处单位截面积上所消耗的冲击功，这个值越大，则韧性越好，受冲击时，越不容易断裂。

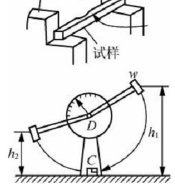


图 6.6 冲击韧度的测定方法

5. 疲劳强度

在汽车上的许多零件中，比如各种轴、齿轮、弹簧、连杆等，要受到大小和方向呈周期性变化的载荷作用。这种交

变载荷虽然小于材料的强度极限，甚至小于其弹性极限，但经多次循环后，在没有明显的外观变形时也会发生断裂，这种破坏称作疲劳破坏或疲劳断裂。这种破坏都是突然发生的，具有很大的危险性。

疲劳强度 σ_{-1} 是表示材料以周期性交变载荷作用而不致引起断裂的最大应力，其大小与应力变化的次数有关。对于黑色金属规定循环次数为 10^7 次，有色金属循环次数为 10^8 次。

为了提高金属的疲劳强度，可以通过改善零件的结构形状，避免应力集中，减小表面粗糙度值，进行表面热处理和强化处理等方法。

6.3 常用金属材料

金属材料可分为黑色金属和有色金属两大类。黑色金属又可以分为钢和铸铁。钢又可分为碳素钢和合金钢。

1. 钢

钢的分类方法很多，如果按钢的用途分类，可分为结构钢、工具钢和特殊性能钢。

钢中除铁以外，碳、锰、硅、硫、磷为基本五大元素。加入其他金属元素则称为合金元素。这些元素在钢中都起一定的作用。

碳(C)在低合金钢中常与合金元素形成碳化物，在常温的较低温度下，能够起强化作用。但在高温下这些碳化物容易分解，对强度起不良影响。随着含碳量的增加，钢的可焊性下降，所以耐热钢中含碳量一般要限制在0.20%以下。

锰(Mn)在钢中小于2%时，对低合金钢来说，可提高钢的强度和韧性。对中、高合金钢而言，随着强度的增加，其塑性和韧性则要降低。增高含锰量可提高钢的耐磨性。

铬(Cr)能提高钢的硬度、耐腐蚀性和抗氧化性。铬能在钢材表面形成一层附着性很强的氧化膜，使钢材具有良好的耐腐蚀性。

镍(Ni)主要是形成稳定的奥氏体组织，提高钢的强度、耐腐蚀性和塑性。铬和镍同时存在，钢材即具有较高的塑性，又具有较高的硬度和强度。

硫(S)是钢中的有害元素，在高温时，钢材容易破裂，称为“热脆”现象，在焊接时会产生热裂纹。

磷(P)也是钢中的有害元素，它使钢材的强度、硬度增加、塑性和韧性下降。这就是钢的冷脆性。

降低钢材中的S和P是改善钢材韧性的重要途径之一，因此优质钢要严格控制钢中S和P的含量。

大家也许都看过《Titanic》这部电影(图6.7)，这艘造船专家认定的“根本不可能沉没的船”为什么会造成和平时期最大的一次海难?

大约过了80年，人们通过金属材料的力学性能分析，才解开了Titanic沉没之谜。主要是因为当时炼钢技术并不成熟，炼出的钢铁如果用现代的标准来检验，根本不能用于造



图 6.7　Titanic 剧照

船。Titanic 上所用的钢板含有许多杂质硫化锌，含硫高的钢板，韧性很差，经焊接出现大量的热裂纹，遇到冰山的撞击，难免会分崩离析。如图 6.8 所示，左图的冲击试样是典型的脆性断口，揭示了 Titanic 的灾难缘由。而近代船用钢板的冲击试样则具有相当好的韧性。

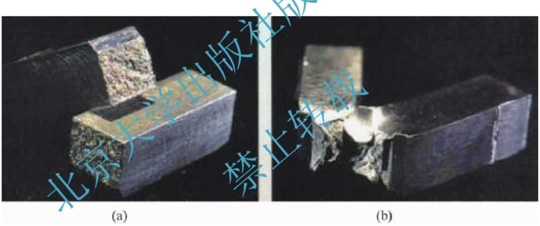


图 6.8　Titanic 号钢板(a 图)和近代船用钢板(b 图)的冲击试验结果

2. 铸铁

在冶金和机械工业中，通常将高炉冶炼的铁产品称为生铁，生铁添加其他金属材料经机械厂重新熔铸则为铸铁。常用铸铁的含碳量 $w_c=2.5\%\sim4.0\%$，铸铁中的硅(Si)、锰(Mn)、硫(S)、磷(P)等元素的含量都比碳素钢高。

铸铁中的碳主要以渗碳体和石墨两种形式存在，根据碳的存在形式不同，铸铁可以分为白口铸铁、灰口铸铁和麻口铸铁。白口铸铁中大部分碳以 Fe_3C 存在，断口呈银白色。灰口铸铁中大部分碳以石墨形式存在、断口呈暗灰色。麻口铸铁中的碳既以渗碳体形式存在，又以石墨状态存在，断口还杂着白亮的游离渗碳体和暗灰色的石墨。

根据铸铁中石墨形态不同，铸铁又可分为灰铸铁(石墨呈片状，牌号以 HT 表示)、可锻铸铁(石墨呈团絮状，牌号以 KT 表示)、球墨铸铁(石墨呈球状，牌号以 QT 表示)和蠕墨铸铁(石墨呈蠕虫状，牌号以 RuT 表示)。值得注意的是，可锻铸铁是因为具有较高的塑性而得名，实际上仍不可锻，属于铸造合金。

表 6-1 列出了一些常见的铸铁牌号和性能。

表6－1 常见的铸铁牌号和性能

牌号	力学性能	应用举例
HT200	抗拉强度可达200MPa	一般机械中重要零件，如小型内燃机的气缸体、缸盖；中速齿轮、带轮；中等精度机床床身等
HT300	抗拉强度可达300MPa	用于承受高载荷、高摩擦、要求高气密性的零件，如大功率发动机气缸体、缸盖；大型精密机床床身，底座等
QT500-7	抗拉强度为500MPa	内燃机的机油泵齿轮，机车车辆轴瓦，机器底座，传动轴等
QT900-2	最低抗拉强度为900MPa	用于制造高强度高耐磨性的零件，如内燃机曲轴，凸轮轴，汽车转向节等
KTH350-10	最低抗拉强度为350MPa	用于制造承受较高冲击、振动的零件，如汽车减速器壳、农用犁刀等
RuT300	最低抗拉强度为350MPa	可以制造强度高、组织致密、承受热疲劳载荷、形状复杂的零件，如制动盘、排气管、气缸盖、钢锭模、活塞环等

3. 有色金属及其合金

有色金属是指钢铁以外的其他金属。有色金属种类很多，又具有某些独特的性能，是工业上不可缺少的金属材料，有色金属应用较广的是铝、铜、钛及其合金和滑动轴承合金。

1）铝及铝合金

纯铝呈银白色，密度为2.7g/cm^3。纯铝强度较低，但导电、导热性能优良，仅次于银和铜，主要用于制造电线电缆，很少用作结构材料。

以铝为主要元素，加入少量其他元素(硅、铜、镁、锌、锰)形成的合金称为铝合金(图6.9)，可以用作工程结构材料。铝合金可以分为铸造铝合金和形变铝合金。铸造铝合金牌号为“ZL”加三位数字表示，第一位数字表示合金系列，1表示铝硅合金，2表示铝铜合金，3表示铝镁合金，4为铝锌合金，后两位为序号。而形变铝合金则可分为防锈铝合金、硬铝合金、超硬铝合金和锻造铝合金，代号分别为LF、LY、LC、LD。表6－2列出了部分铝合金类别、代号及应用。

表6－2 部分铝合金牌类别、代号及应用

类别	代号	应用
铝硅合金	ZL101	飞机、仪表零件
铝铜合金	ZL201	内燃机活塞、气缸头等
铝镁合金	ZL301	海洋舰船和石化领域零件
铝锌合金	ZL401	结构形状复杂的汽车、飞机仪表零件
防锈铝合金	LF5	焊接油箱、油管、焊条、铆钉
硬铝合金	LY11	中等强度结构件，如螺旋桨、骨架
超硬铝合金	LC4	主要受力构件，如飞机大梁
锻造铝合金	LD7	高温下工作的复杂锻件及结构件


(a) 活塞


(b) 门窗


(c) 轮毂

图 6.9　铝合金制品

2）铜及铜合金

纯铜本色呈玫瑰红，由于表面易氧化变紫色，故又可称为紫铜，密度为 8.94g/cm^3。纯铜的塑性很好，可进行各种冷、热加工。冷加工可以提高其强度，但塑性明显降低，所以常用合金方法来强化。加入元素有锌、锡、铝、铅、镍、锰、铍等元素后形成的合金，称为铜合金(图 6.10)。铜合金主要有黄铜和青铜。

黄铜以锌为主要的合金元素。只含锌的铜合金称为普通黄铜，除锌之外还有其他元素的，称为特殊黄铜。H80 就是一种普通黄铜，数字 80 表示铜的含量为 80%。当锌的质量分数为 30%时，强度和塑性达到最佳，俗称三七黄铜，适于制造较深的拉深件，如炮弹。当锌的质量分数超过 45%后，黄铜没有使用价值。含锌量较低的黄铜(牌号为 H96、H80、H68 等)，色泽美观，且易于冷、热加工，可以用制造金属网、装饰板、散热器、薄壁管及其他冲压件。含有锡、锰、铝、铅等元素的黄铜称为特殊黄铜。例如，锡的主要作用是提高黄铜在海水中的耐蚀性，同时提高强度和硬度，称为锡黄铜(如 HSn90-1)，可以用于制造海轮零件；铝能在合金表面形成坚固的氧化膜，提高在海水中的耐蚀性并显著提高强度和硬度，铝黄铜(如 Hal60-1-1)用于制造耐腐蚀管材和海轮零件。


(a)


(b)

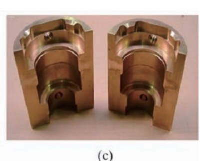

(c)

图 6.10　铜合金制品

3）钛及钛合金

纯钛(元素符号 Ti)是银白色的金属，密度为 4.54g/cm^3，在常温下，钛表面易生成一层极薄的致密的氧化物保护膜，表现出强的抗腐蚀性。

以钛为主要元素，加入少量其他元素形成的合金称为钛合金。钛合金是近半个世纪才发展起来的新型结构材料，具有比强度高、低温性能好、耐高压、抗振动、耐腐蚀性能好等诸多优点，在航空航天、医疗、化工等领域应用日益广泛。

钛合金可以分为 α 型钛合金、β 型钛合金和 α+β 型钛合金。α 型钛合金以铝、锡为主

要合金元素，具有良好的热稳定性、热强性和焊接性。β型钛合金以铌、钼、钒为主要合金元素，塑性好，易于成形和焊接。α+β型钛合金的合金元素包括了α稳定元素铝、锡和β稳定元素钼、钒、铬、锰等，成分调整范围大，性能适应性强。

钛合金牌号以TA表示α型，TB表示β型，TC表示α+β型，后接序号。例如，TC4(Ti-6Al-4V属于热处理强化的钛合金，它具有较好的焊接性薄板成形性和锻造性能，用于制造喷气发动机压缩机叶片、叶轮等。表6-3列出了部分钛合金类别、代号及应用。

表6-3 部分钛合金牌类别、牌号及应用

类别	牌号	应用
α型钛合金	TA7	制作承受力较大的钣金件和锻件
β型钛合金	TB1	紧固件和飞机结构件
α+β型钛合金	TC4	喷气发动机压缩机叶片、叶轮

4. 金属材料的实用鉴别方法

在日常购物时，我们常常需要了解商品的材质，买衣服如此，买金属制件也如此。当我们装修房子或检修汽车的时候，一定很关心卫生间挂件是镀锌的还是不锈钢的，发动机是铸铝的还是铸铁的。生活中，没有条件来对所接触到的金属材料进行准确的化学成分、金相组织和硬度的测定，因为这些科学仪器分析(光谱分析仪、金相显微镜、扫描电镜、硬度计等)都太专业，价格太高。这里介绍几种简单易行的经验鉴定方法。

(1) 看一看。通过观看外观色泽和生锈的状况。铸铁颜色发暗，钢材发亮。锈斑厚而发黄、呈褐色的，是碳钢或铸铁；锈斑呈褐红色而薄的，是高合金钢；锈斑呈绿色的是铜器。

(2) 掂一掂。同样大小的金属制件，用手掂一掂，感受分量的大小，可以用来判断材料外表面经过处理、难以直观判断时的场合。铝很轻，钢铁较重。

(3) 敲一敲。敲击金属材料，听声音。越清脆，硬度越高；越沉闷，硬度越低。

(4) 锉一锉。用锉刀稍用力锉削，能锉动的，则可以直接车、铣、锯；锉不动的话，说明淬过火，太硬了，要加工的话，得上磨床或用砂轮加工。

(5) 吸一吸。用磁铁靠近金属材料，完成没有磁性的，是奥氏体不锈钢、铁素体不锈钢、铝或铜；有磁性但较弱的，是马氏体不锈钢；磁性较强的，则是其他种类的钢。

6.4 金属热处理

生活中我们也许有进行“热处理”的体验，煮饺子的时候，要在饺子漂起来后，用凉水激一下，然后再烧开，这样饺子比较爽口，煮面条和炒芹菜也是这样。这相当于热处理中的“淬火”。

金属热处理是将固态金属或合金采用适当的方式进行加热、保温和冷却等手段，以获得所需要的组织结构与性能的工艺。其特点是：在固态下，只改变工件的内部组织，而不改变其形状和尺寸。对金属材料进行热处理，通常有以下四个方面的目的：①提高零件的

使用性能；②充分发挥钢材的潜力；③延长零件的使用寿命；④改善工件的工艺性能，提高加工质量，减小刀具的磨损。

根据加热和冷却方法的不同，金属材料热处理可分为以下两大类：

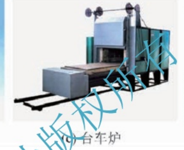
(1) 普通热处理：退火、正火、淬火、回火、调质。

(2) 表面热处理：表面淬火和化学热处理。

热处理设备有三大类：一是加热设备，常见的有箱式电阻炉、井式电阻炉、台车式电阻炉、盐浴炉等，如图 6.11 所示；第二类为冷却设备，常用的有水槽、油槽、缓冷坑等；第三类为质量检测设备，包括各种硬度计、金相显微镜等。


(a) 箱式炉


(b) 井式炉


(c) 台车炉


(c) 盐浴炉

图 6.11　常用的热处理加热设备

热处理方法虽然很多，但任何一种热处理工艺都是由加热、保温、和冷却三个阶段所组成的。热处理工艺过程可用在温度-时间坐标系中的曲线图表示，这种曲线称为热处理工艺曲线。如图 6.12 所示。

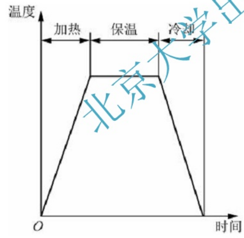


图 6.12　热处理工艺曲线图

在热处理工艺中，钢的加热目的是为了获得奥氏体，奥氏体是钢在高温状态时的组织，其强度及硬度高，塑性良好，晶粒的大小、成分及其均匀化程度，对钢冷却后的组织和性能有重要影响。因此，钢在加热时，为了得到细小均匀的奥氏体晶粒，必须严格控制加热温度和保温时间，以求在冷却后获得高性能的组织。

冷却是热处理的关键工序，成分相同的钢经加热获得奥氏体组织后，以不同的速度冷却时，将获得不同的力学性能，见表 6-4。

表 6-4　冷却速度与硬度

冷却方法	随炉缓冷	空冷	油冷	水冷
冷却速度	10℃/min	10℃/s	150℃ /s	600℃ /s
所得硬度(HRC)	12	26	41	63

6.4.1　普通热处理

俗话说："新官上任三把火"，普通热处理却有"四把火"，分别是退火、正火、淬火、

回火。这四种热处理的主要区别在于金属加热后冷却的速度不同，因此得到的结果也就不一样。

1. 退火

将钢加热到适当温度，保持一定时间，然后缓慢冷却(一般随炉冷却)，即得到较软的金相组织，这种热处理工艺称为退火。退火是软化金属材料的唯一途径，其工艺周期长，耗费能源多。

退火的应用有：对铸造零件退火，可以消除内应力，防止使用中变形；锻造毛坯进行退火，可以改善切削加工性能。

工艺过程：加热→保温→随炉缓慢冷却。

2. 正火

将钢加热到一定温度，保温一定时间，再在空气中冷却。正火的冷却速度比退火快，生产周期短，成本较低。正火可以消除工件内部过大的应力，细化晶粒，均匀组织，改善不合理的组织，获得一定范围内的力学性能。因此，正火有时候可以代替淬火，用来提高一些不太重要的受力零件(如销轴、螺栓、螺母、刀杆等)的综合性能，另外，正火可以改善钢铁材料的切削性能。

工艺过程：加热→保温→出炉冷却。

3. 淬火与回火

将工件加热到预定温度后，保温预定时间，然后浸入到冷却介质(纯水、盐水、油等)，急剧冷却下来，使其获得较高硬度。将淬火后的工件，再重新加热到较第一次温度低一些的温度，保温后冷却，就是回火。淬火常与回火配合使用，淬火加回火是强化钢铁材料的主要手段。

经过淬火，可以使得材料的强度、硬度、耐磨性明显提高，但塑性、韧度下降，伴随着内应力的产生，再经过不同温度的回火处理，可以消除内应力，防止零件变形开裂，获得各种不同的优良性能。

淬火加回火，常用于处理重要受力零件(曲轴、连杆、齿轮)、刃具、量具、弹簧等。工艺过程为先淬火(加热→保温→快冷)，然后进行回火(加热→空冷)。该工艺又可以分为三类：

(1) 淬火+高温回火：又称为调质，回火加热温度为500～650℃，得到硬度为20～30HRC、具有良好的综合力学性能的回火索氏体。调质处理用于受力复杂的曲轴、连杆、齿轮等零件，如图6.13(a)所示。

(2) 淬火+中温回火：回火加热温度为350～450℃，得到硬度为35～50HRC、具有高弹性和韧性的回火屈氏体。主要用于各种弹簧的热处理，如图6.13(b)所示。

(3) 淬火+低温回火：回火加热温度为150～250℃，得到硬度为58～64HRC、具有高的硬度、耐磨性和尺寸稳定的的回火马氏体。主要用于各类高碳钢制作的刃具、模具、量具的热处理，如图6.13(c)所示。

表6-5列出了常用金属材料的名称、牌号、力学性能特点、常用热处理方法及主要用途。


(a) 曲轴


(b) 弹簧


(c) 锉刀

图 6.13 经淬火+回火的零件

表 6-5 常用金属材料及热处理

材料名称	牌号	主要特点	常用热处理方法	应用举例
普通碳素结构钢	Q235	韧性好	一般不进行热处理	金属结构件、钢板、钢筋、标准件
优质碳素结构钢	45	综合性能优良	正火、调质(淬火+高温回火)	受力较大的零件：主轴、曲轴、齿轮、连杆等
低合金结构钢	20CrMnTi	强韧	渗碳+淬火+低温回火	承受冲击载荷的齿轮、销轴
碳素工具钢	T10(T10A)	强硬、耐磨	淬火+低温回火	刨刀、拉丝模、丝锥、手用锯条、钻头、车刀等
高速钢	W18Cr4V	强硬、红硬性好	一到二次预热后高温淬火+三次高温回火	红硬性要求不是很高的整体式刀具
硬质合金	YG6	硬而耐磨	不进行热处理	切削铸铁的刀片
	YT15	软而耐冲击	不进行热处理	切削钢件的刀片
不锈钢	1Cr18Ni9Ti	强韧、无磁性、耐腐蚀	固溶处理(水淬)	耐酸、碱、盐腐蚀的设备零件，医疗器械、食品器具
灰铸铁	HT200	耐磨、减震性好、缺口敏感性好、易切削	时效处理	座椅支架、床身、齿轮箱、飞轮、液压缸、轴承座等
锡青铜	QSn4-3	塑性好、耐磨	退火	弹簧、滑动轴承
铸铝	ZL101	铸造工艺性好	淬火+自然时效 淬火+人工时效	仪表壳体、水泵壳体
硬铝	LY11	塑性好	淬火+自然时效	中等强度结构件：骨架、铆钉、螺旋桨

6.4.2 表面热处理

金属材料的表面热处理分为表面淬火和化学热处理两大类。表面淬火工艺有火焰加热和感应加热。而化学热处理包括渗碳、氮化和碳氮共渗等三种方法。

1. *表面淬火*

在生产中，有一些零件在弯曲、扭曲等循环载荷、冲击载荷以及摩擦条件下工作，如齿轮、凸轮、曲轴、活塞销、机床床身等，它们要求表面硬度高、耐磨，而心部要求有足

够的塑性和韧性。还有一些零件，如卡规，只要求某一局部具有更高的硬度和耐磨性。对于这样的性能要求，单从选材或采用整体热处理难以解决，而需要采用表面淬火或局部淬火来解决，局部淬火是一种特殊的表面淬火。根据加热方法不同，表面淬火可分为火焰加热表面淬火、感应加热表面淬火、接触加热表面淬火和激光加热表面淬火等。其中，以火焰加热表面淬火和感应加热表面淬火应用最广。

1）火焰加热表面淬火

火焰加热表面淬火是以高温火焰为热源的一种表面淬火方法，常用的火焰为氧-乙炔焰(最高温度为3200℃)、氧-煤气焰(最高温度为2000℃)。将高温火焰喷射到工件表面，使其快速加热到淬火温度，随即喷水或乳化液进行冷却，以获得所需要的表面硬度及淬硬层深度，如图6.14所示。

图6.14 火焰加热表面淬火

火焰加热表面淬火的淬硬层深度一般为2～6mm，适用于中碳钢、中碳合金结构钢以及大型铸铁件的表面处理。

2）感应加热表面淬火

将工件放入由空心铜管绕成的感应圈中，当感应线圈中通入一定频率的交流电时，会产生交变磁场，交变磁场在工件内产生同频率的感应电流。感应电流在工件内自称回路，称为“涡流”。涡流在工件表层集中，心部电流密度几乎为零，称为“集肤效应”，由此产生大量的焦耳热，使工件的表层迅速加热到淬火温度，而心部温度仍然接近室温，随后淬火时，只有工件的表面层形成了马氏体，从而达到了表面淬火的目的，如图6.15所示。

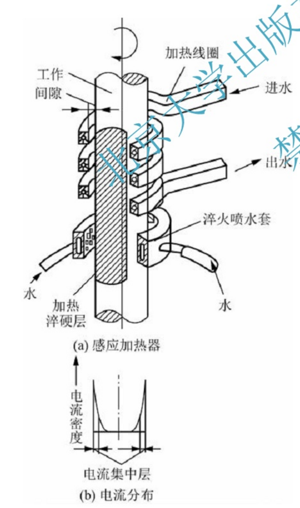


图6.15 感应加热表面淬火

研究发现，交流电频率越高，“集肤效应”越明显，涡流透入深度越浅，淬透层深度越小。高频淬火(通常200～300kHz)，淬硬深度为0.2～2mm，主要用于中小零件的表面淬火。中频淬火(通常0.5～10kHz)，可以用于淬硬层要求较深的大尺寸零件的表面淬火，而工频淬火(50Hz)，淬硬层深度为10～15mm，主要用于大型工件的表面淬火，如压辊、火车车轮等。

2. 化学热处理

化学热处理是指将钢件放入一定温度的化学介质中保温，使一种或几种元素渗入它的表

层，以改变其表层化学成分、组织和性能的热处理工艺。化学热处理种类很多，最常用的是渗碳和渗氮。

1）渗碳

渗碳是向钢的表面渗入碳原子的过程，目的是使工件在热处理后表面具有高的速度和耐磨性，而心部仍保持一定强度以及较高的韧性和塑性。主要用于经受严重磨损以及较大冲击载荷的零件，如齿轮、凸轮轴、活塞销等。

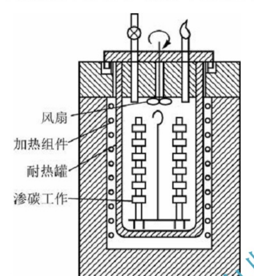


图 6.16　气体渗碳法示意图

常用的渗碳方法有气体渗碳和固体渗碳。气体渗碳（图 6.16）是将工件装入密封的渗碳炉中，加热到 900～950℃，向炉内滴入煤油、苯、甲醇、丙酮等碳氢化合物，或直接向炉内通入煤气、液化气等含碳气体，反应产生的活性碳原子吸附在表面并扩散至内部，形成 0.5～2mm 渗碳层。

2）渗氮

渗氮是向钢的表面渗入氮原子的过程，又称为氮化。其目的是提高表面的耐磨性和硬度，并提高疲劳强度和抗腐蚀性。主要有气体渗氮和离子渗氮两种方法。

和渗碳相比，渗氮件具有更高的表面硬度、耐磨性、抗腐蚀性、疲劳强度和较小的变形。渗氮后，工件表面形成合金氮化物，使其具有很高的硬度、耐磨性和红硬性。比如，可以用于高速传动的精密齿轮、高速柴油机曲轴、高精度机床主轴等的表面处理。

思考及实践

1. 盘点一下你在学校每天接触到哪些金属制品，大致区别一下它们的材料和加工方法。

2. 碳素钢中的五种基本元素对钢的性能有什么影响？

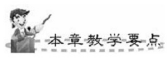
3. 不锈钢是否永远不生锈呢？自己查查资料，弄清楚不锈钢耐腐蚀的机理。

4. 到大型超市的五金制品区去做一个调研，看看有哪些铜合金和铝合金材料制品？

5. 黄铜和青铜如何区别？

6. 有机会到工业区的热处理厂去看一看，了解一下各种金属材料的热处理方法有什么作用。

第7章 锻造



知识要点	掌握程度	相关知识
锻造的概念、历史和应用	掌握锻造的概念； 了解锻造的发展史； 熟悉锻造工艺的应用	锻造的概念； 锻造的发展史； 锻造工艺的应用
自由锻造	了解自由锻的特点和应用场合； 了解自由锻的主要设备； 熟悉自由锻的工艺过程	自由锻的特点和主要设备； 自由锻的主要设备； 自由锻的工艺过程
模锻	掌握模锻的特点和应用场合； 了解模锻的工艺过程 了解模锻的分类	模锻的特点和应用场合； 模锻的工艺过程； 胎模锻、锤上模锻及压力机上模锻的特点和应用
特种锻造	了解特种锻造的种类； 熟悉精密锻造和粉末锻造的工艺特点	特种锻造的种类； 精密锻造和粉末锻造的工艺特点

7.1 概　　述

锻造就是利用设备和工具的共同锻打作用，使原材料发生体积转移，得到所需形状的锻件，是制造形状较为简单而重要的机械零件毛坯的主要方法。通常锻造在热态下进行，因此锻造也称为热锻。近年来，冷锻和温锻工艺得到快速发展，可以有效获得近(净)成形锻件，因此，锻造已经可以用来生产半成品或者成品了。

锻造是最古老的金属加工方法之一，可以追溯到公元前4000年，那时候就有了用锻造方法成形的黄金、红铜等有色金属制品，但在青铜器出现之前，有色金属制品的主流是用于饰品、礼器和少量生活用具，在促进社会生产力发展方面不占主导地位。

钢是锻造的主要加工对象。从汉代到南北朝时期，中国古代的炼钢技术逐渐成熟，与现代不同，古代的炼钢术都是以固态的铁料为主，掺入脱碳剂或增碳剂，加热后经反复锻打完成，因此才有了“百炼成钢”的成语。钢，特别是中、高碳钢，可以经过热处理得到满足各种需要的综合力学性能，钢又是可以固态塑性成形的金属，这都是铸铁无法比拟的。剑是中国古代最高贵的冷兵器，许多武侠小说和影视作品都把宝剑的制造描绘成熊熊烈火中的锻造过程，这些文学艺术描绘的场景如今无法准确考证。但可以肯定的是，钢质锻件的出现使“铁器时代”向前跨进了一大步，促进了历史文明的发展，但受锻造成形原理所限，它没有像古代铸造技术那样为后人留下无数灿烂辉煌、令人瞩目的艺术作品，因而也就从未受到过应有的重视，让人更为遗憾的是，许多传统的锻造技术现在已经消失或正被遗忘。

最初，人们靠抡锤进行锻造(俗称“打铁”)，后来出现通过人拉绳索和滑车来提起重锤再自由落下的方法锻打坯料。14世纪以后出现了畜力和水力落锤锻。1842年，英国的内史密斯制成第一台蒸汽锤，使锻造进入应用动力的时代。以后陆续出现锻造水压机、电机驱动的夹板锤、空气锻锤和机械压力机。夹板锤最早应用于美国内战(1861～1865)期间，用以模锻武器的零件，随后在欧洲出现了蒸汽模锻锤，模锻工艺逐渐推广。到19世纪末已形成近代锻压机械的基本门类。20世纪初期，随着汽车开始大量生产，热模锻迅速发展，成为锻造的主要工艺。

锻造通常是为金属材料的切削加工提供高质量的锻件毛坯，对提高机械零件的加工工艺性起到了不可或缺的作用。对于现代汽车而言，锻件使用比例的多少甚至可以作为划分汽车安全性或质量的重要指标。锻造生产能力及其工艺水平的高低，在一定程度上反映了一个国家的工业水准。

因为锻造能消除原材料(轧材、金属铸锭)中的一些缺陷(裂纹、疏松等)，使其内部晶粒细化，组织致密，力学性能明显提高，因此，可以改善金属的内部组织，提高金属的力学性能。锻件的质量小至不足1kg，大至数百吨；既可进行单件、小批量生产，又可进行大批量生产，适应范围广，且具有较高的劳动生产率。采用精密模锻还可使锻件尺寸、形状接近成品零件，因而可以大大地节省金属材料和减少切削加工工时。

在工程实际中，只要是关键的场合，都能看到锻件的身影。重要的机器零件，如汽车曲轴高速齿轮、曲轴、连杆、突缘、万向节等大都采用锻造制坯(图7.1)。

根据锻造温度不同，锻造可分为热锻、温锻和冷锻三种，其中热锻应用最为广泛。按



图 7.1　锻造的应用

所用的设备和工(模)具的不同，锻造可分为自由锻造、胎模锻造和模型锻造等。其中，自由锻适合于单件、小批量生产，胎模锻适合中、小批量生产，而模锻则适用大批量生产。

7.2　自由锻造

将坯料置于铁砧上或锻压机器的上、下砥铁之间直接进行锻造，称为自由锻造(简称自由锻)。前者称为手工自由锻(简称手锻)，后者称为机器自由锻(简称机锻)。

自由锻生产率低，劳动强度大，锻件的精度低，对操作工人的技术水平要求高。但其所用的工具简单，设备通用性强，工艺灵活。所以广泛用于单件、小批量零件的生产，对于制造重型锻件，自由锻则是唯一的加工方法。

1. 自由锻的主要设备

自由锻常用的设备有空气锤、蒸汽-空气锤及水压机等。

空气锤的吨位(锤头重量)一般为65～750kg。它的特点结构较简单，操作方便，维护容易，设备投资少，吨位不大，适用于生产小型锻件。如图7.2所示。

蒸汽-空气锤是利用0.7～0.8MPa压力的蒸汽或0.6～0.8MPa的压缩空气来工作的。蒸汽锤由于在蒸汽的作用下工作，规定的压力有保证，而机构稳定性好，故落下部分的质量可显著增大，锤击功能大为提高。一般吨位为0.5～5t。蒸汽锤需用一套辅助设备，如蒸汽锅炉或空气压缩机等，较空气锤复杂。它适合锻造中型或较大的锻件，是一般机器制造厂中普遍使用的设备。

水压机的吨位是用它所产生的最大压力表示。由于压力机压下速度较慢，相当于无冲击的静压力作用于坯料使金属变形，故其工作时震动和噪声小，劳动条件较好，且压力作用的时间长，容易达到较大的锻造深度，可获得整个截面为细晶粒组织的锻件，因此广泛地采用水压机来代锻锤。水压机也是特大型锻件自由锻造的主要设备。其缺点是需一套供

水系统与操纵系统，设备庞大，造价很高。常用水压机的压力为5000～150000kN(500～15000t)，可以锻造质量为1～300t的锻件。图7.3是中国一重生产的15000t水压机。



图7.2　150kg空气锤



图7.3　15000t水压机

2. 自由锻工艺过程

自由锻的基本工序分为基本工序、辅助工序和精整工序3类。

基本工序是实现锻件基本成形的工序，如镦粗、拔长、冲孔、弯曲、切割等；辅助工序是为基本工序操作方便而进行的预先变形工序，如压钳口、压肩、倒棱等；修整工序是用以减少锻件表面缺陷而进行的工序，如校正、滚圆、平整等。

实际生产中最常用的是镦粗、拔长、冲孔3个基本工序。

1）镦粗

如图7.4所示，镦粗是使坯料截面增大，高度减小的锻造工序，有完全镦粗和局部镦粗两种。通常用来生产盘类件毛坯，如齿轮坯、法兰盘等。完全镦粗是将坯料直立在下砧上进行锻打，使其沿整个高度产生高度减小。局部镦粗分为端部镦粗和中间镦粗，需要借助于工具(胎模或垫环)来进行。

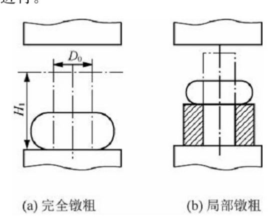


图7.4　完全镦粗和局部镦粗

2）拔长

拔长是使坯料的长度增加，截面减小的锻造工序。通常用来生产轴类件毛坯，如车床主轴、连杆等。拔长的工艺要点有：送进、翻转、锻打。每次送尽量要合适，以砥铁宽度的0.3～0.7倍为宜。翻转要连续不断，为便于翻转后继续拔长，压下量要适当，应使坯料横截面的宽度与厚度之比不要超过2.5。将圆截面的坯料拔长成直径较小的圆截面时，

必须先把坯料锻成方形截面，在拔长到边长接近锻件的直径时，再锻成八角形，最后打成圆形。拔长工序如图 7.5 所示。

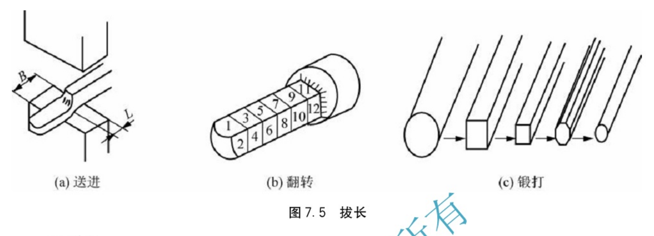


图 7.5　拔长

3）冲孔

冲孔是指用冲子在坯料上冲出通孔或不通孔的锻造工序。冲孔分单面冲孔和双面冲孔，分别如图 7.6 和图 7.7 所示。单面冲孔适用于坯料较薄的场合。

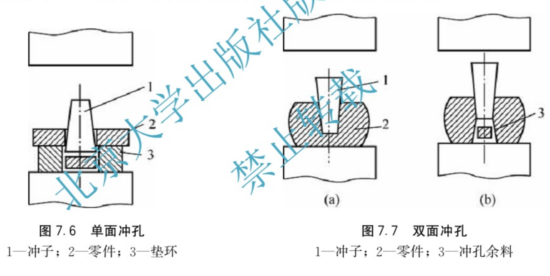


图 7.6　单面冲孔

1—冲子；2—零件；3—垫环

图 7.7　双面冲孔

1—冲子；2—零件；3—冲孔余料

4）弯曲

使坯料弯曲成一定角度或形状的锻造工序称为弯曲，如图 7.8 所示。

5）扭转

使坯料的一部分相对另一部分旋转一定角度的锻造工序称为扭转，如图 7.9 所示。

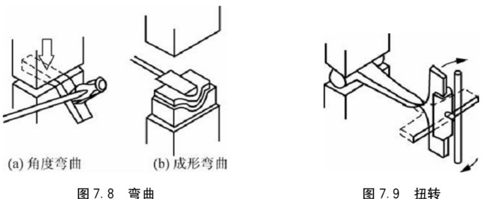


图 7.8　弯曲

图 7.9　扭转

6）切割

将锻件从坯料上分割下来或切除锻件的工序称为切割，如图 7.10 所示。自由锻造的基本工序还有扭转、错移等。

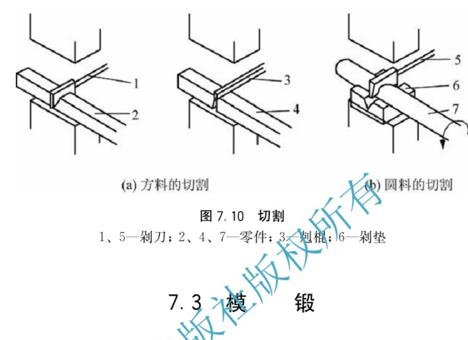


图 7.10　切割

1、5—剁刀；2、4、7—零件；3—剁棍；6—剁垫

7.3　模　　锻

模型锻造简称模锻。模锻是在高强度模具材料上加工出与锻件形状一致的模膛(即制成锻模)，然后将加热后的坯料放在模膛内受压变形，最终得到和模膛形状相符的锻件。按照锻件的复杂性，模锻的工艺过程可分为：

(1) 简单模锻件：下料—加热—终锻—切边、冲孔—校正。

(2) 复杂模锻件：下料—加热—制坯—预锻—终锻—切边、冲孔—校正。

模锻与自由锻相比有以下特点：

(1) 能锻造出形状比较复杂的锻件；

(2) 模锻件尺寸精确，表面粗糙度值较小，加工余量小；

(3) 生产率高；

(4) 模锻件比自由锻件节省金属材料，减少切削加工工时。此外，在批量足够的条件下可降低零件的成本；

(5) 劳动条件得到一定改善。

但是，模锻生产受到设备吨位的限制，模锻件的尺寸不能太大。此外，锻模制造周期长，成本高，所以模锻适合于中小型锻件的大批量生产。按所用设备不同，模锻可分为胎模锻、锤上模锻及压力机上模锻等。

1）胎模锻

胎模锻是在自由锻造设备上使用简单的模具(胎模)来生产模锻件的工艺。胎模锻一般采用自由锻方法制坯，然后在胎模中终锻成形。胎模不固定于设备上，锻造时根据工艺过程可随时放上或取下。胎模锻生产比较灵活，它适合于中小批量生产，在缺乏模锻设备的中小型工厂大多采用。常用的胎模结构主要有以下 3 种类型，如图 7.11 所示。

(1) 扣模：用来对坯料进行全面或局部扣形，主要生产杆状非回转体锻件。

(2) 套筒模：锻模呈套筒形，主要生产锻造齿轮、法兰盘等回转体类锻件。

(3) 合模：通常由上模和下模两部分组成，为了使上、下模吻合及避免锻件产生错模，经常用导柱等定位。

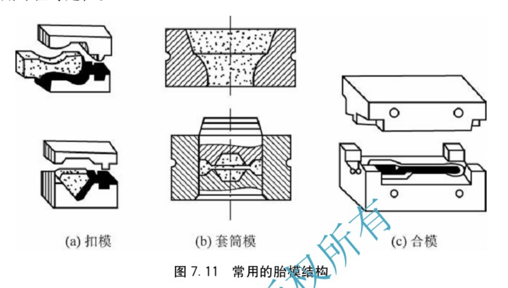


图 7.11　常用的胎模结构

2) 锤上模锻

在锻锤上进行的模锻称为锤上模锻。常用的模锻设备是蒸汽-空气模锻锤，其运动精确，砧座较重，结构刚度较高，锤头部分质量为 1～16t。如图 7.12 为齿轮坯锤上模锻的模具及过程，上模和下模分别用斜楔铁紧固在锤头和砧座的燕尾槽内，上模与锤头一起作上下往复运动。上下模间的分界面为分模面，分模面上开有飞边槽。锻后取出模锻件，切去飞边和冲孔连皮，便完成模锻过程。

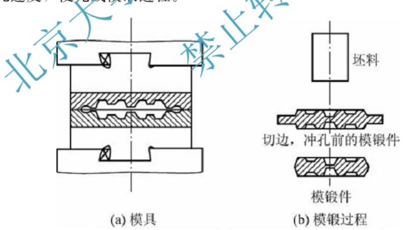


图 7.12　齿轮坯锤上模锻

3) 压力机上模锻

压力机上模锻分为机械压力机上模锻和曲柄压力机上模锻两大类。

(1) 机械压力机上模锻。

锤上模锻虽具有适应性广的特点，但振动和噪声大，能耗大，因此有逐步被机械压力机所取代的趋势。用于模锻的压力机有曲柄压力机、平锻机、螺旋压力机及水压机等。

(2) 曲柄压力机上模锻。

曲柄压力机上模锻具有锤击力近似静压力，振动及噪声小，机身刚度大，导轨与滑块间隙小(用于保证上下模对准)等特点，因此，锻件尺寸精度高。但不适宜于拔长和滚压等

工步。生产率高，每小时可生产 400～900 件。锻件尺寸精度较高，表面质量好。节省材料，材料利用率可达 85%～95%。但对非回转体及中心不对称的锻件难以锻造。

7.4 特种锻造

特种锻造是在专用锻压设备上或在特殊模具型槽内使坯料成形的一种特殊锻造工艺。一般锻造方法很难达到要求时，可用特种锻造工艺。如精密模锻，挤压，摆动辗压，辊锻，粉末锻造，液态模锻，等温模锻和超塑性模锻等。挤压将在第 10 章详细介绍，这里只介绍精密模锻和粉末锻造。

1. 精密模锻

精密模锻是在普通模锻基础上逐步发展起来的一种少无切削锻造新工艺。精密模锻件的公差、余量约为普通模锻件的 1/3 左右，表面粗糙度 Ra 值为 3.2 ～1.6 μm，精度可达 IT15～IT12。采用精密模锻件可节省大量机械加工工时和大量金属材料，一般不需机械加工或只需少量机械加工就可装配使用；精密模锻件的金属流线能沿零件外形合理分布而不被切断，有利于提高零件的疲劳强度及抗应力腐蚀性能。

精密模锻是提高机械制造工业生产率的一种重要方法，也是锻压技术发展的一个重要方向。精密模锻虽然优点很多，但并不是在任何条件下都是经济的。这是因为精密模锻要求高质量的毛坯、精确的模具、少无氧化的加热条件、良好的润滑和较复杂的工序间清理等，所以所生产的零件只有达到一定的批量时才能大幅度地降低零件的总成本。实现精密模锻的方法很多，有等温模锻、超塑性锻造、温锻等特种锻压工艺，并可采用专用设备及专用模具。如图 7.13 为采用温锻工艺成形的汽车内球笼，是汽车传动系统中重要零部件。



图 7.13 内球笼精锻件

2. 粉末锻造

粉末锻造又称为粉末冶金锻造，是将粉末冶金与精密模锻结合起来的一种新工艺。它是以金属粉末为原料，经过冷压成形、烧结、热锻成形或由粉末经热等静压、等温模锻或直接由粉末热等静压及后续处理等工序制成所需形状的精密锻件。经锻造，既可显著提高粉末冶金材料的力学性能，又可保留粉末冶金的优点。

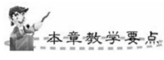
粉末锻造的毛坯为烧结体或挤压坯、或经热等静压的毛坯。与采用普通钢坯锻造相

比，粉末锻造的优点有：材料利用率高(可达90%)；尺寸精度高，表面粗糙度值低，表面质量好，容易获得形状复杂的锻件；有利于提高锻件力学性能，材质均匀无各向异性；可进行各种热处理；成本低，生产率高，易实现自动化；金属粉末合金化可改变传统的“来料加工”的锻造加工模式，可实现“产品—材料—工艺”一体化。

思考及实践

1. 什么是锻造？锻造的特点是什么？
2. 自己做过馒头吗？思考一下，锻造和揉面有什么共同点？
3. 钢材锻造时为什么要加热？铸铁加热后是否能锻造？
4. 建议在老师的带领下，到锻造厂参观，了解锻造的设备、工艺过程和能耗情况。
5. 什么是模锻和胎模锻？和自由锻相比有何优缺点？
6. 为什么高档轿车里锻件的比例比较大？

第 8 章
铸　　造



知识要点	掌握程度	相关知识
铸造的历史、概念和特点	熟悉铸造的历史和应用； 掌握铸造的概念和特点	铸造的历史和应用； 铸造的概念和特点
常用铸造合金	了解铸钢、铸造有色金属的特点和应用； 掌握铸铁的特点和应用	铸钢、铸造有色金属的特点和应用； 铸铁的特点和应用
砂型铸造	了解型砂的性能特点； 掌握砂型铸造的工艺过程	型砂的性能特点； 砂型铸造的工艺过程
特种铸造	熟悉熔模铸造的工艺过程和特点； 了解金属型铸造和压力铸造的工艺过程和特点	熔模铸造的工艺过程和特点； 金属型铸造和压力铸造的工艺过程和特点

8.1 概　　述

铸造有6000多年的历史，自古以来就有广泛应用，远古时期的司母戊大方鼎、永乐大钟等艺术品都是采用铸造方法成形的。生活中的公园长椅、暖气片、下水道井盖等也都用到了铸造方法。铸件的大小可以仅轻几克，也可以重达百吨。在现代工业中，一般机械设备中铸件约占45%～90%，汽车、摩托车中铸件约占50%～70%等。如图8.1为各种铸件。铸造的成本较低。所需的设备投资较少，原材料价格低，来源广，废料如废零件、切屑可回炉使用。因此，铸造方法在机械制造中获得广泛应用，在一些机器中铸件可占机器总重的80%。

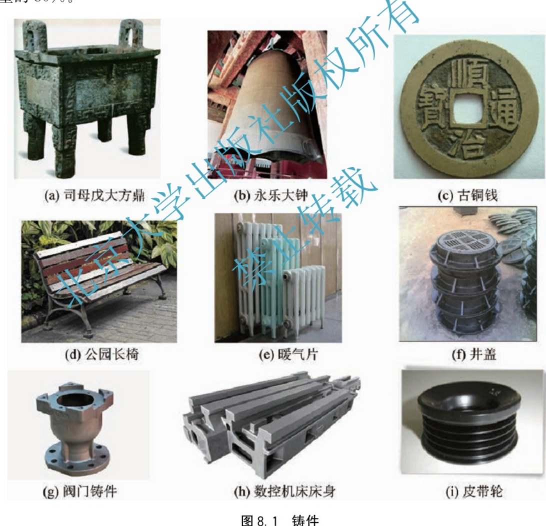


图8.1　铸件

铸造是指将熔融金属注入具有与零件形状相适应的铸型空腔(型腔)中，等其冷却凝固后，获得毛坯或零件的成形方法。如图8.2所示。用铸造方法得到一定形状与性能的金属称为铸件。

铸造具有以下优点：

(1) 可以生产出形状复杂，特别是具有复杂内腔的零件毛坯，如各种箱体、床身、机架等。

(2) 铸造生产的适应性广，工艺灵活性大。工业上常用的金属材料均可用来进行铸造，铸件的重量可由几克到几百吨，壁厚可由0.5mm～1m。

(3) 铸造用原材料大都来源广泛，价格低廉，并可直接利用废机件，故铸件成本较低。

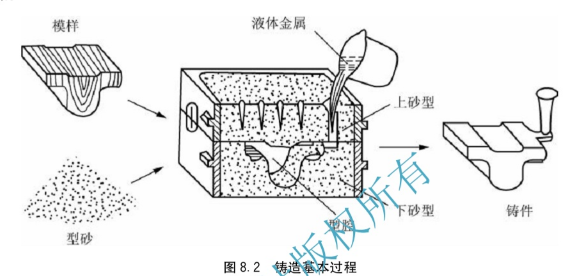


图8.2 铸造基本过程

但任何事情都有其两面性，铸造的不足也很明显。铸件常有组织疏松、晶粒粗大，内部易产生缩孔、缩松、气孔等缺陷，而且铸件质量不够稳定。铸件的力学性能，特别是冲击韧度，低于同种材料的锻件。

8.2 常用铸造合金

熔融金属与铸型是铸造的两大基本因素。铸件常用金属有：铸铁、铸钢、铸造有色金属。其中，铸铁用得最普遍。

1. 铸铁

铸铁的生产设备和工艺简单，价格便宜，并具有许多优良的使用性能和工艺性能，所以应用非常广泛，是工程上最常用的金属材料之一。它可用于制造各种机器零件，如机床的床身、床头箱；发动机的汽缸体、缸套；轧机的轧辊及机器的底座等。

值得注意的是，可锻铸铁常用来制造形状复杂、承受冲击和振动载荷的零件，如汽车拖拉机的后桥外壳、管接头、低压阀门等。这些零件用铸钢生产时，因铸造性不好，工艺上困难较大；而用灰口铸铁时，又存在性能不能满足要求的问题。与球墨铸铁相比，可锻铸铁具有成本低、质量稳定、铁水处理简单、容易组织流水生产等优点。尤其对于薄壁件，若采用球墨铸铁易生成白口，需要进行高温退火，采用可锻铸铁更为适宜。

2. 铸钢

按化学成分的不同，铸钢可分为碳素铸钢和铸造合金钢。碳素铸钢是指以碳为主要合金元素并含有少量其他元素的铸钢。根据碳质量分数的高低可分为低碳、中碳和高碳铸钢。铸钢的强度与球墨铸铁相近，但铸钢的冲击韧度和疲劳强度都高得多，另外，铸钢的焊接性能远比铸铁优良。对于具有较高力学性能或某些特殊性能要求的零件或工具，可采

用合金铸钢(即铸造合金钢)。合金铸钢按其合金质量分数可分为低合金铸钢和高合金铸钢。

因为铸钢的熔点较高，钢液易氧化、钢水的流动性差、收缩大，其体收缩率为10%～14%，线收缩为1.8%～2.5%，因此，铸钢的力学性能比铸铁高，但其铸造性能却比铸铁差。为防止铸钢件产生浇不足、冷隔、缩孔和缩松、裂纹及黏砂等缺陷，往往采取比铸铁复杂的工艺措施。

3. 铸造有色金属

铸造铝合金熔点低、流动性好、对型砂耐火度要求不高，可用细砂造型，以减小铸件表面粗糙度值，还可浇注薄壁复杂铸件。

铸造黄铜熔点低、结晶温度窄(30～70℃)，流动性好、对型砂耐火度要求不高，可用细砂造型，以减小铸件表面粗糙度值、减小加工余量，并可浇注薄壁铸件。但其收缩率大、容易产生集中缩孔，铸造时应配置较大的冒口。

锡青铜在液态下易氧化，凝固温度宽(150～200℃)，凝固收缩和线收缩率小，虽不易产生大的集中缩孔，但常出现枝晶偏析与缩松，降低铸件的致密度。这种缩松便于储存润滑油，适宜制造滑动轴承。壁厚不大的锡青铜铸件常采用同时凝固原则，锡青铜适合采用金属型铸造，利用快速冷却与补缩，铸件结晶细小致密。

铝青铜凝固温度范围小，有利于提高流动性和铸件组织致密度，广泛应用于制造重要的齿轮、轴套、蜗杆和阀体等铸件。

8.3 砂型铸造

铸造包括砂型铸造和特种铸造两大类。在铸件生产中，砂型铸造的应用最为普遍。直接形成铸型的材料是型砂，且液态金属完全靠重力充满整个铸型型腔的铸造，称为砂型铸造。砂型铸造用的造型材料主要是用于制造砂型和用于制造砂芯的芯砂。通常型砂是由原砂(山砂或河沙)、黏土(常用膨润土)和水按一定比例混合而成。

型砂的质量直接影响铸件的质量。型砂质量差会使铸件产生气孔、砂眼、黏砂、夹砂等缺陷。良好的型砂应具备以下性能：

(1) 透气性：型砂空隙能让气体透过的性能称为透气性。高温金属液浇入铸型后，铸型内充满大量气体，这些气体必须从铸型内顺利排出去；否则将使铸件产生气孔、浇不足等缺陷。

(2) 湿强度：湿型砂抵抗外力破坏的能力称为湿强度。型砂必须具备足够高的湿强度才能在造型、搬运、合箱过程中不发生破损、塌陷，浇注时也不会破坏铸型表面和防止铸型胀大。但型砂的强度也不宜过高；否则会因铸型过硬而导致铸型的透气性、退让性下降，使铸件产生缺陷。

(3) 耐火性：耐火性是指型砂抵抗高温热作用的能力。耐火度主要取决于砂中二氧化硅的质量分数，型砂中二氧化硅质量分数越多，型砂颗粒就越大，耐火性越好。耐火性差，铸件易产生黏砂。

(4) 可塑性：可塑性是指型砂在外力作用下变形，去除外力后能完整地保持已有变形



的能力。可塑性好，型砂柔软容易变形，使造型操作方便，制成的砂型形状准确、轮廓清晰。手工起模时在模样周围砂型上刷水的作用是增加局部型砂的水分，以提高可塑性。

(5) 退让性：退让性是指铸件在凝固和冷却过程中产生收缩时，型砂可被压缩、退让的能力。退让性不足，铸件易产生内应力、变形或裂纹等缺陷。型砂越紧实，退让性越差。在型砂中加入木屑、焦炭粒等物可以提高其退让性。

(6) 溃散性：溃散性是指浇注后型砂容易溃散的性能。溃散性好，型砂容易从铸件上清除，可以节省落砂和清砂的劳动量。溃散性与型砂比及黏结剂种类有关。

用型砂紧实造型的铸造方法称为砂型铸造。砂型铸造是应用最广泛的一种铸造方法，其主要工序包括：制造模样、制备造型材料、造型、造芯、合型、熔炼、浇注、落砂、清理与检验等。

用造型混合料及模样等工艺装备制造铸型的过程称为造型。造型是砂型铸造最基本的工序，通常分为手工造型和机械造型两大类。

全部用手工或手动工具完成的造型工序称为手工造型。手工造型的方法很多，按砂箱特征分有两箱造型、三箱造型、地坑造型等。按模样特征分有整模造型、分模造型、挖砂造型、假箱造型、活块造型和刮板造型等。可根据铸件的形状、大小和生产批量加以选择。手工造型操作灵活、工艺装备简单，但生产效率低，劳动强度大，仅适合于单件小批量生产。两箱整模造型过程如图 8.3 所示，其特点是：模样是整体结构，最大截面在模样一端为平面；分型面多为平面；操作简单。整模造型适用于形状简单的铸件，如盘、轴承、盖类。

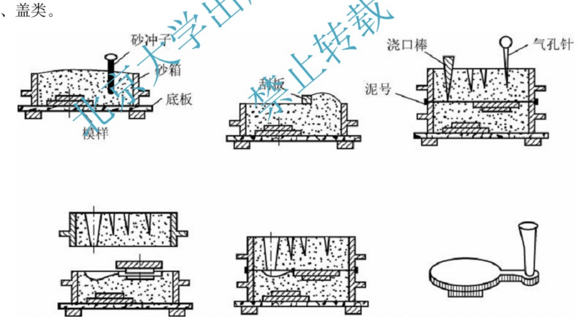


图 8.3　盘类两箱整模造型过程

随着现代化生产的发展，机器造型已代替了大部分的手工造型，机器造型不但生产率高，而且质量稳定，是成批大量生产铸件的主要方法。机器造型的实质是把造型过程中的主要操作(紧砂和起模)实现机械化。为了提高生产率，采用机器造型的铸件，应尽可能避免活块和砂芯，同时机器造型只适合两箱造型，因无法造出中箱，故不能进行三箱造型。机器造型根据紧砂和起模方式不同，有气动微振压实造型、射压造型、高压造型和抛砂造型。

为获得铸件的内腔或局部外形，用芯砂或其他材料制成的、安放在型腔内部的铸型组元称型芯。绝大部分型芯是用芯砂制成的。砂芯的质量主要依靠配制合格的芯砂及采用正确的造芯工艺来保证。

将上型、下型、型芯、浇口杯等组合成一个完整铸型的操作过程称为合型，又称合箱。合型是制造铸型的最后一道工序，直接关系到铸件的质量。即使铸型和型芯的质量很好，若合型操作不当，也会引起气孔、砂眼、错箱、偏芯、飞边和跑火等缺陷。首先要进行铸型的检验和装配，然后再进行紧固。铸型紧固后即可浇注，待铸件冷凝后，开箱落砂清除浇冒口便可获得铸件。

8.4 特种铸造

随着科学技术的发展，对铸造提出了更高的要求，要求生产出更加精确、性能更好、成本更低的铸件。为适应这些要求，铸造工作者发明了许多新的铸造方法，这些方法统称为特种铸造方法，即特种铸造。这里只介绍熔模铸造、金属型铸造和压力铸造三种。

1. 熔模铸造

熔模铸造又称失蜡法。失蜡法是用蜡制作所要铸成器物的模子，然后在蜡模上涂以泥浆，这就是泥模。泥模晾干后，再焙烧成陶模。一经焙烧，蜡模全部熔化流失，只剩陶模。一般制泥模时就留下了浇注口，再从浇注口灌入铜液，冷却后，所需的器物就制成了。失蜡法出现并成书于我国春秋时期，那时的中国古代工匠已经能用这种方法制作复杂而华丽的铜器，如图8.4所示。中国传统的熔模铸造技术对世界的冶金发展有很大的影响。现代工业的熔模精密铸造，就是从传统的失蜡法发展而来的。虽然无论在所用蜡料、制模、造型材料、工艺方法等方面，它们都有很大的不同，但是它们的工艺原理是一致的。20世纪40年代中期，美国工程师奥斯汀创立以他命名的现代熔模精密铸造技术时，曾从中国传统失蜡法得到启示。

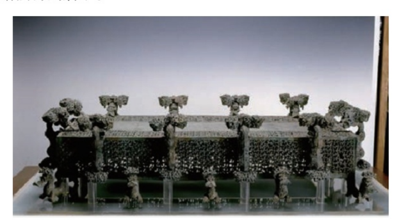


图8.4　“失蜡法”铸造的铜器

熔模铸造是用易熔材料制成模样，在模样上涂挂若干层耐火涂料，待硬化后熔出模样形成无分型面的型壳，经高温焙烧后即可浇注获得铸件的方法。

熔模铸造的主要工艺过程如图8.5所示。

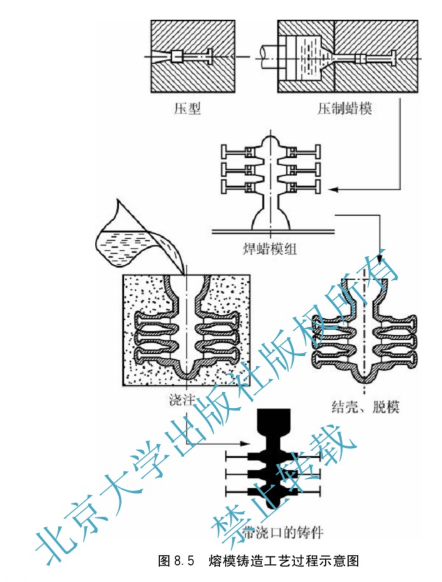


图 8.5　熔模铸造工艺过程示意图

1）蜡模制造

首先根据铸件的形状和尺寸，用钢、铜或铝合金制造压型；然后把熔化成糊状的蜡质材料(常用50％石蜡＋50％硬脂酸)压入压型中，待冷却凝固后取出，修去分型面上的毛刺后得到单个的蜡模；为能一次铸出多个铸件，可将多个蜡模黏合在一个蜡制的浇注系统上，构成蜡模组。

2）型壳制造

在蜡模组上涂挂耐火涂料层以制成具有一定强度的耐火型壳。首先将蜡模浸入涂料中(石英粉＋水玻璃、硅酸乙酯等)；取出后撒上石英粉(砂)；再浸入氯化铵的溶液中进行硬化。重复上述过程4～6次，制成5～10mm厚的耐火型壳。待型壳干燥后，置于90～95℃的热水中浸泡，熔出蜡料即得到一个中空的型壳。

3）焙烧、浇注

将型壳在850～950℃的炉内进行焙烧，去除残留的蜡料和水分，并提高型壳的强度；将焙烧后的型壳趁热置于砂箱中，并在其周围填充砂子或铁丸固定之，即可进行浇注。

2. 金属型铸造

金属型铸造是指将液体金属在重力作用下浇入金属铸型，以获得铸件的一种方法。铸

型用金属制成，可以反复使用几百次到几千次。金属型和砂型，在性能上有显著的区别，如砂型有透气性，而金属型则没有；砂型的导热性差，金属型的导热性很好，砂型有退让性，而金属型没有。金属型的这些特点决定了它在铸件形成过程中有自己的规律。

首先，金属在充填时，型腔内的气体必须迅速排出，但金属又无透气性，只要对工艺稍加疏忽，就会给铸件的质量带来不良影响。在设计金属型时就必须有排气设施，其排气的方式有以下几种：(1)利用分型面或型腔零件的组合面的间隙进行排气；(2)开排气槽。即在分型面或型腔零件的组合面上，芯座或顶杆表面上做排气槽；(3)设排气孔。排气孔一般开设在金属型的最高处；(4)排气塞是金属型常用的排气设施。

其次，金属液一旦进入型腔，就把热量传给金属型壁。液体金属通过型壁散失热量，进行凝固并产生收缩，而型壁在获得热量、升高温度的同时产生膨胀，结果在铸件与型壁之间形成了“间隙”。在“铸件-间隙-金属型”系统未到达同一温度之前，可以把铸件视为在“间隙”中冷却，而金属型壁则通过“间隙”被加热。

最后，金属型或金属型芯，在铸件凝固过程中无退让性，阻碍铸件收缩，这是它的又一特点。

3. 压力铸造

压力铸造(简称压铸)的实质是在高压作用下，使液态或半液态金属以较高的速度充填压铸型(压铸模具)型腔，并在压力下成形和凝固而获得铸件的方法。高压和高速充填压铸型是压铸的两大特点。与其他铸造方法相比，压铸有以下三方面优点：(1)产品质量较好。铸件尺寸精度高，一般相当于6～7级，甚至可达4级；表面光洁度好，一般相当于5～8级；强度和硬度较高，强度一般比砂型铸造提高25%～30%；(2)经济效益优良。由于压铸件尺寸精确，表面光洁等优点。一般不再进行机械加工而直接使用，或加工量很小，所以既提高了金属利用率，又减少了大量的加工设备和工时；(3)铸件价格便宜。

压铸虽然有许多优点，但也有一些缺点：(1)压铸时由于液态金属充填型腔速度高，流态不稳定，故压铸件易产生气孔，不能进行热处理；(2)对内部复杂的铸件，压铸较为困难；(3)压铸高熔点合金(如铜合金，黑色金属)，压铸型寿命较低；(4)不宜小批量生产，其主要原因是压铸型制造成本高，压铸机生产效率高，小批量生产不经济。

压铸是先进的金属成形方法之一，是实现少切屑，无切屑的有效途径，应用很广，发展很快。目前压铸合金不再局限于有色金属的锌、铝、镁和铜，而且也逐渐扩大用来压铸铸铁和铸钢件。

思考及实践

1. 到金工实习厂动手制作一个砂型。
2. 与锻造相比，铸造有什么优点和缺点？
3. 砂型铸造的一般过程是怎样的？
4. 简述熔模铸造的工艺过程。
5. 金属型铸造和砂型铸造相比，有什么特点？
6. 汽车上有哪些零件是采用铸造工艺制造毛坯的？查找资料或咨询汽车专业人士。

第9章
板料冲压

本章教学要点

知识要点	掌握程度	相关知识
冲压的特点和应用	掌握冲压的概念； 熟悉冲压的应用； 了解冲压的特点	冲压的概念； 冲压的应用； 冲压的特点
冲压生产工艺	掌握冲压的两大基本工序； 了解成形工序的种类和应用 了解复合工序及其应用	冲压的两大基本工序； 成形工序的种类和应用； 复合工序及其应用
冲压设备	了解冲压机的原理和结构； 熟悉冲压模具的组成和分类	曲柄压力机的原理和结构； 冲压模具的组成； 简单模、复合模和级进模
精冲技术	了解精冲产生的背景； 熟悉精冲的特点和应用	精冲产生的背景； 精冲的特点和应用

9.1 概　　述

如果说对于非机械专业的同学而言，铸造和锻造的产品，在生活中所见不多。但是，冲压产品我们每天都会接触。你每一天的衣食住行，都要和冲压产品打交道，从美观、耐用的面盆和餐盘，到便宜、实用的纽扣和拉链，还有女生喜欢的饰品和金属化妆镜盒，如图 9.1 所示，都要用到板料冲压工艺。



图 9.1　生活中的冲压件

冲压件不仅在日常生活用品中占据非常重要的位置，而且在现代航空、航天、兵工、汽车、电机、电器和电子仪表生产中也占有十分重要的地位。全世界的钢材中，有 60%～70%是板材，其中大部分是经过冲压制成成品。汽车的车身、底盘、油箱、散热器片，锅

炉的汽包、容器的壳体、电机的铁芯硅钢片等都是冲压加工的。仪器仪表、家用电器、自行车、办公设备、生活器皿等产品中，也有大量冲压件。

冲压是通过装在压力机上的模具对板料施压使之产生分离或变形，从而获得一定的形状、尺寸和性能的零件或毛坯的加工方法。按照冲压时的温度情况有冷冲压和热冲压两种。我们所说的冲压，一般指的是冷冲压。冷冲压是金属在常温下的加工，一般适用于厚度小于 4mm 的坯料。

与铸件、锻件相比，冲压件尺寸精度高，表面光洁，零件强度高，质量稳定，互换性好。采用冲压工艺，不仅可加工形状复杂的薄壁件，而且可制出其他方法难于制造的带有加强筋、肋、起伏或翻边的工件。另外，由于生产率高、操作方便，工艺过程容易实现机械化和自动化。

但是，冲模制造周期长，制模技术要求高，费用高，在小批量生产中受到一定限制。

由于冲压加工工艺的优点突出，在国民经济各部门中获得了广泛应用。

9.2　冲压生产工艺

由于冲压件的形状、尺寸、精度要求、生产批量和所选用的材料性质等的不同，所采用的工艺也不同，但它的基本工序可以分为两大类，即分离和成形工序。

分离工序是指被加工材料在外力的作用下，使材料沿一定轮廓形状剪切破裂而分离的冲压工序，通常称为冲裁，如图 9.2 所示。

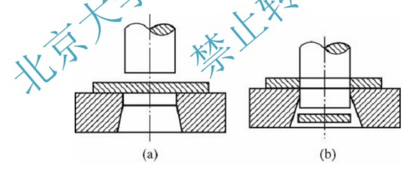


图 9.2　冲裁工序示意图

成形工序的目的是使板料在不破坏的条件下发生塑性变形，制成所需形状和尺寸的工件。成形工序很多，这里只简单介绍一下弯曲、拉深、翻边和缩口。

弯曲是将金属板料毛坯、型材、棒材或管材等按照设计要求的曲率或角度成形为所需形状零件的冲压工序。弯曲工序在生产中应用相当普遍。零件的种类很多，如汽车的纵梁、自行车车把、各种电器零件的支架、门窗铰链等，如图 9.3 为常见的弯曲件，图 9.4 则为主要的弯曲成形方法。

如图 9.5 所示为拉深示意图，当坯料置于凹模上时，它在凸模的作用下被拉入凸凹模的间隙中，形成空心零件。

毛坯的平面部分或曲面部分的边缘，沿一定曲线翻起竖立直边，这样的工序就是内孔翻边。如图 9.6 所示，为内孔翻边示意图。

缩口是将管件或空心制件的端部加压，使其径向尺寸缩小的加工方法，如图 9.7 所示。

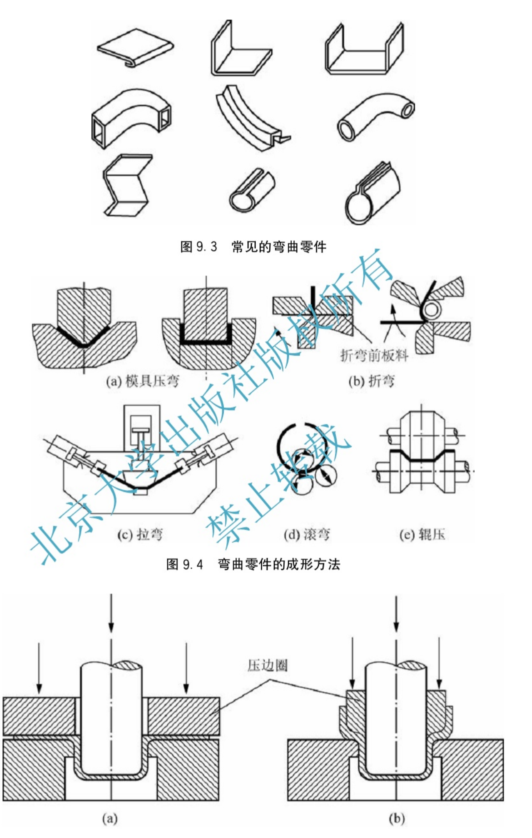


图 9.3 常见的弯曲零件

图 9.4 弯曲零件的成形方法

图 9.5 拉深示意图



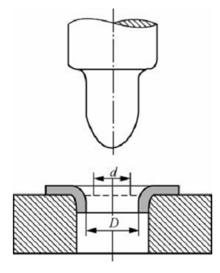


图 9.6 内孔翻边示意图

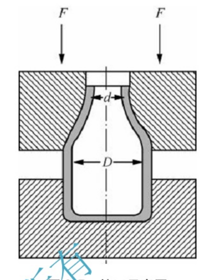


图 9.7 缩口示意图

由于篇幅原因，这里不对各种具体的冲压工序逐个介绍，留给大家到企业参观时观察思考和总结。

此外，大批量生产中，为了提高生产效率，结合零件的结构特点和工艺要求，有时将两个或两个以上不同的冲压工序复合在一起同时冲压成形，称之为复合工序。如落料—冲孔、落料—拉深—切边、落料—冲孔—翻边复合等。很多冲压零件都是用复合工序加工而成的。以一种齿轮轴上的挡油盘环的冲压工艺为例，材料是 08 钢，钢板厚度 1.1mm，毛坯直径 65.4mm。第一道工序是落料和拉深；第二道工序是冲出 ϕ27mm 的孔和 8 个 ϕ4mm 的孔；第三道工序是孔翻边；第四道工序是孔扩张胀形工序。挡油盘环冲压工艺过程，如图 9.8 所示。

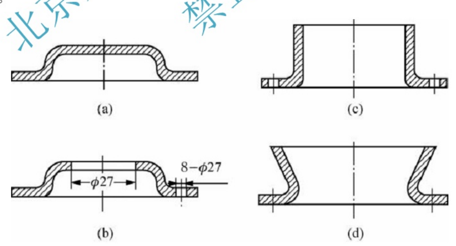


图 9.8 挡油盘环冲压工艺过程

9.3 冲压设备

冲压的主要设备是压力机和冲压模具，如果加上待冲压的金属板，就构成了冲压系统。压力机就是用来对放置于模具中的金属板料实现压力加工提供动力和运动的设备。压

力机可根据产生与传递压力的机理来分类，使用液体传递压力的为液压机，使用气体传递压力的为气动压力机，以电磁力做功的称为电磁压力机，以机械机构传递压力的即为机械传动类压力机。

曲柄压力机属于机械传动类压力机，它是一种常见的压力加工设备(图9.9)，能进行各种冲压工艺加工，直接生产出半成品或成品。


图9.9 曲柄压力机

按工艺用途，曲柄压力机可分为通用压力机和专用压力机两大类。通用压力机适用于多种工艺用途，如冲裁、弯曲、成形、浅拉深等。

而专用压力机的用途较单一，如拉深压力机、板料折弯机、剪板机、冷镦自动机、高速压力机精压机、热模锻压力机等。

按机身结构形式的不同，曲柄压力机可以分为开式压力机和闭式压力机。开式压力机的机身工作区域三面敞开，操作空间大，但机身刚度差，不能适应大负荷的加工，所以，一般吨位比较小，在2000kN(200t)以下。开式压力机又可分为单柱和双柱压力机两种。按工作台结构不同，开式压力机可分为可倾台式压力机(图9.10)、固定台式压力机、升降台式压力机。

而闭式压力机(图9.11)机身左右两侧是封闭的，操作空间小，不太方便，但是机身组成一个框架结构，压力机精度高，可以承受的负荷大，吨位超过250t的大中型曲柄压力机都是这种结构。


图9.10 开式双柱可倾式压力机


图9.11 闭式压力机

按运动滑块的数量，曲柄压力机可分为单动、双动和三动压力机，如图9.12所示。目前，单动压力机使用最多，双动和三动压力机主要用于拉深工艺。

尽管曲柄压力机的类型众多，其工作原理和基本组成是相同的。曲柄压力机的工作原理是，电动机的能量和运动通过一系列的传动后，传给曲柄轴，再通过连杆带动滑块作上下直线移动，由于上模固定在滑块上，下模固定在工作台上，因此压力机变能对置于上、



下模间的板料加压，依靠模具将其制成工件。可以想象，一辆汽车的引擎将汽油燃烧后会产生压力，用这个压力把气缸压下，从曲柄轴得到旋转力的过程，冲压机的工作过程是与这一过程正好相反。这样会更好理解。

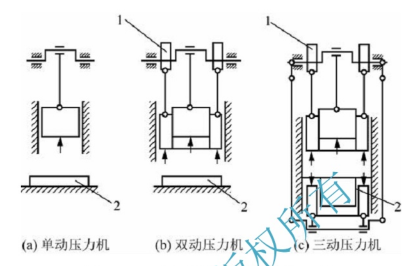


图 9.12　压力机按滑块数量的分类示意图

1—凸轮；2—工作台

上模与下模相当于一对刀具(工具)，它们共同组成一套模具，如图 9.13 所示。试着联想一下剪刀就不难理解了。

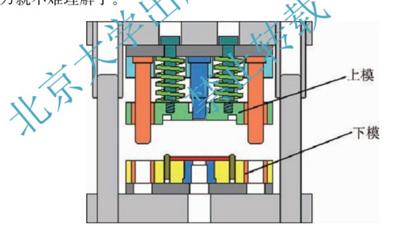


图 9.13　冲压模具

没有冲压模具就不能进行冲压加工。冲压模具除可以冲裁钢板以外，还可以压弯、拉深板料，使之发生永久的变形，得到想要得到的形状。

模具的质量、性能直接影响到冲压件的质量和冲压生产效率，具有极为重要的作用，可以说是冲压加工的生命。因此，模具产业被称作机械行业中的“黄金产业”，具有很高的技术含量和经济价值，从事模具行业的优秀技师和工程师在人才市场很吃香，能获得较高的收入。

冲压是高效的生产方法，采用复合模，尤其是多工位级进模，可在一台压力机上完成多道冲压工序，实现由带料开卷、矫平、冲裁到成形、精整的全自动生产。生产效率高，劳动条件好，生产成本低，一般每分钟可生产数百件。

在压力机的一次工作行程中，在模具同一部位同时完成数道冲压工序的模具，称为复

合模。复合模的设计难点是如何在同一工作位置上合理地布置好几对凸、凹模。

图 9.14 是落料冲孔复合模的基本结构。在模具的一方是落料凹模，中间装着冲孔凸模；而另一方是凸凹模，外形是落料的凸模，内孔是冲孔的凹模。若落料凹模装在上模上，称为倒装复合模；反之，称为顺装复合模。

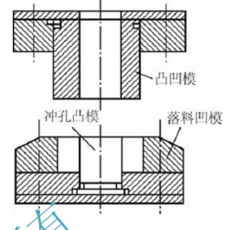
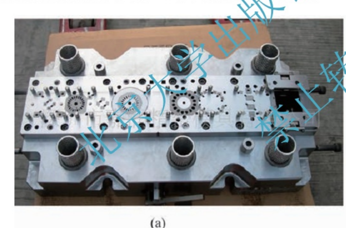


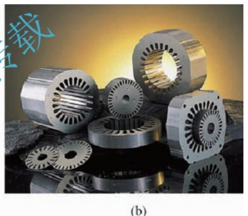
图 9.14 落料冲孔复合模的基本结构

复合模的特点是：结构紧凑，生产率高，制件精度高，特别是制件孔对外形的位置度容易保证。另一方面，复合模结构复杂，对模具零件精度要求较高，模具装配精度也较高。

级进模(也叫连续模)由多个工位组成，各工位按顺序关联完成不同的加工，在冲床的一次行程中完成一系列的不同的冲压加工。一次行程完成以后，由冲床送料机按照一个固定的步距将材料向前移动，这样在一副模具上就可以完成多个工序，一般有冲孔，落料，折弯，切边，拉深等等。级进模是多任务序冲模，在一副模具内，可以包括冲裁，弯曲成形和拉深等多种多道工序，具有很高的生产效率。如图 9.15 为一套电机铁芯级进模以及加工出的电机定转子铁芯。



(a)



(b)

图 9.15 电机铁芯级进模及其冲压制品

9.4 精 冲 技 术

精冲技术从发明到现在已经 90 多年了。最早的精冲技术，可以追溯至 1923 年，德国人 F. Schiess 首先取得了精冲技术的专利权。1924 年 F. Schiess 在瑞士 Lichtensteig 建立了世界上第一个精冲工厂。早期(1923～1956)的精冲技术比较神秘，仅仅用在钟表、打字机、纺织机械工业领域；随后的 20 年里，精冲技术开始普及，主要在机械、仪器仪表、照相机、电子、小五金、家电等工业领域获得了应用，近三十多年是精冲技术的快速发展时期，精冲技术开始进入汽车、摩托车和计算机工业领域。

精冲技术是在普冲基础上发展起来的先进工艺方法。各种不同的精冲方法，按其工艺

方式，主要分为普通精冲、强力压边精冲、对向凹模精冲和往复冲裁四类。精冲和普冲的主要区别是由于冲裁模具间隙不同导致材料出现断裂后的裂纹扩展机理不一样。精冲的模具间隙为冲压件单边厚度的0.5%，而普冲的模具间隙为冲压件单边厚度的5%～10%。在普通冲裁中，材料都是从模具刃口处产生裂纹而剪切分离，制件尺寸精度低(<IT11)，断面粗糙(Ra=12.5～6.3μm)，不平直，断面有一定斜度，往往不能满足零件较高的技术要求，有时还需再进行多道后续的机械加工。精密冲裁是使材料呈纯剪切的形式进行冲裁，是通过改进模具来提高精度和改善断面质量的，制件尺寸精度可达到IT6～IT9，断面粗糙度Ra=1.6～0.4μm，断面垂直度可达89°30′或更佳。

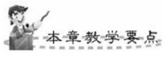
强力压边精冲的工艺原理是：在三动压力机上，借助特殊结构的精冲模，在强力作用下，使材料产生塑性——剪切变形，从而得到优质的精冲零件。它的出现，从根本上改变了金属材料加工工艺链。因此，精冲绝不是一种替代加工工艺方法，而是一种高质量、高效率、高附加值的加工工艺。

精冲虽然与普冲同属于分离工艺，但是包含有特殊工艺参数的加工方法。由它生产的零件也具有不同的质量特征。特别是在精冲与冷成形(如弯曲、拉深、翻边、镦挤、压沉孔、半冲孔和挤压等)加工工艺相结合后，精冲零件已有可能在许多领域(如汽车、摩托车、电子工业等)，取代以前由普冲、机加工、锻造、铸造和粉末冶金加工的零件，因而发挥其巨大的技术优势和经济效益。

思考及实践

1. 到步行街或五金批发市场看看，列出至少20种生活中常用的五金冲压制品。
2. 与锻造和铸造相比，板料冲压有什么特点?
3. 冲压的主要设备有哪些? 建议到五金制品厂去参观一下。
4. 分离和成形工艺有什么不同? 举例说明。
5. 采用复合模和级进模的冲压工艺有什么特点?
6. 到优酷或土豆网上观看一些冲压加工(特别是连续模和自动冲压生产线)的视频，增加对板料冲压的感性认识。

第10章 挤压与拉拔



知识要点	掌握程度	相关知识
挤压与拉拔概述	掌握挤压和拉拔的概念； 熟悉挤压和拉拔的应用	挤压和拉拔的发展历史； 挤压和拉拔的概念； 挤压和拉拔的应用
挤压设备与工艺	了解挤压设备； 熟悉冷挤压工艺； 了解热挤压工艺	挤压设备； 冷挤压工艺； 热挤压工艺
拉拔设备与工艺	了解拉拔设备； 了解拉拔与拉拔-旋压联合工艺	拉拔的设备； 拉拔工艺与拉拔-旋压联合工艺

10.1 概　　述

挤压和拉拔都金属材料塑性成形的工艺方法。通常所说的挤压又称为冷挤压，其发展初期是比较缓慢的，主要用来挤压铅和锡等软金属，直到18世纪末之后，才开始挤压硬度较高的金属，如铅、铝、紫铜、黄铜等。1788年英国开始用蒸汽机驱动轧机，使铜材、铅材加工业由手工作坊变成了使用机器的工厂。1797年英国布朗曼(S. Braman)设计了挤压铅管的挤压机。1894年美国开始生产铝板材，20世纪初开始生产铝箔和挤压铝材。由于冷挤压需要提供很大的压力，由于当时不能提供挤压钢材所需的模具材料、合适的润滑剂与大吨位的压力机等问题，长期以来一直认为挤压钢是十分困难甚至不可能的事情。

1906年，英国人科斯利(T. W. Coslett)发现用磷酸处理钢件制品是一种较为理想的防锈方法，但工序繁多且成本高，未能广泛应用。不过，这种防锈法的出现却激发了人们研究更为简单有效的防锈新方法，后来，用连续自动装置对钢毛坯进行磷酸防锈处理只需要两分钟，处理过的毛坯表面附有脂肪润滑剂或钠皂薄膜，薄膜不易脱落，挤压这种毛坯时，压力较小，这种发现使得人们找到了一种理想的钢毛坯表面处理法——磷化皂化法。

磷化皂化处理钢毛坯表面方法的出现使钢的挤压成为可能。1934年，德国人采用磷化皂化法成功地挤压出钢管，第二次世界大战期间，由于黄铜供应不足，德国人秘密试验用冷挤压生产钢弹壳并获得成功。

钢的冷挤压到1947年才开始用于民品生产，很快美国和日本在冷挤压技术方法获得突破，并广泛应用于汽车和电器行业。近年来，我国在冷挤压技术方面获得了迅猛发展，但和发达国家还有很大的差距。

挤压，是指对放在模具型腔(或挤压筒)中的材料一端施加压力，使其通过模孔成形的加工方法，如图10.1所示。

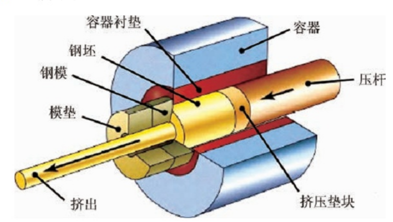


图10.1　金属挤压示意图

在挤压工艺中，坯料在力的作用下通过一个模具，类似于挤牙膏。挤压成形可以产生几乎任何实心或者空心截面。由于在挤出过程中，模具的几何形状保持不变，因此挤出件具有恒定的截面。

挤压成形可以在室温或者高温下进行，延展性好的材料可以冷挤压，延展性差的材料可以热挤压。

用挤压方法可以生产品种繁多的实心式空心制品，典型产品有滑门的轨道、各种不同截面和不同结构形状的管件、门和窗户的边框等。挤出件可以按照所需要的长度切割，变成诸如支架、齿轮、挂衣架等单个的零件。


(a) 移门轨道　(b) 伞齿轮　(c) 无缝钢管

图 10.2　挤压产品

用外力作用于被拉金属的前端，将金属坯料从小于坯料断面的模孔中拉出，使其断面减小而长度增加的方法，称之为拉拔，如图 10.3 所示。由于拉拔多在冷态下进行，因此也叫冷拔或冷拉。金属拉拔产品有线材、棒材和异型材等，如图 10.4 所示。

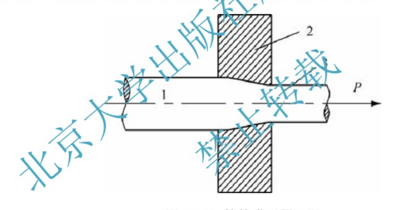


图 10.3　拉拔成形原理图

1—坯料；2—模子；3—制品

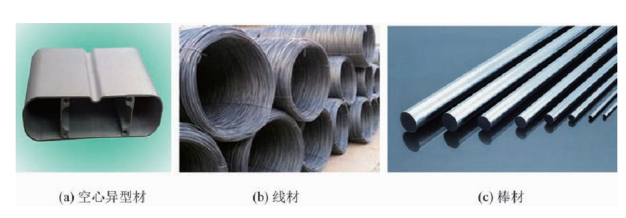

(a) 空心异型材　(b) 线材　(c) 棒材

图 10.4　拉拔产品



10.2　挤压设备与工艺

1. 挤压设备

挤压机是挤压车间的主要设备。一个挤压车间视其生产规模的大小，可以选用一台或几台挤压机进行挤压生产。挤压机的类型及其性能参数是决定其他辅助设备技术性能的基本依据。

按工作轴线的位置、结构类型、传动方式、加工方法及生产的产品，挤压机可以分很多类。

挤压机按其传动方式分为机械式和液压式。机械式最大特点是挤压速度快，但挤压速度是变化的，这对工具的寿命和制品性能的均匀性很不利，因此应用有限。液压式在挤压领域使用最为广泛。

按工作轴线的位置可分为卧式挤压机和立式挤压机。卧式挤压机最为常见，如图 10.5 所示，为一种卧式液压铝材挤压机。按其挤压方法，卧式挤压机又可以分为正向挤压机、反向挤压机和联合挤压机。联合挤压机可实现正挤压或反挤压 可实现正挤压或反挤压。它们之间的基本结构没有原则性的差别。



图 10.5　卧式液压铝材挤压机

2. 挤压工艺

1）冷挤压工艺

冷挤压工艺通常可分为正向挤压法和反向挤压法。

正向挤压法是指金属的流动方向与挤压杆(挤压轴)的运动方向相同的挤压生产方法。由于变形金属与挤压筒壁之间有相对运动，二者之间有很大的滑动摩擦，使得挤压力增大，金属变形流动不均匀，容易导致组织性能不均匀，于是限制了挤压速度提高，加速了工模具的磨损。

反向挤压法是指金属的流动方向与挤压杆(或模子轴)的相对运动方向相反的挤压生产方法。由于变形金属与挤压筒壁之间无相对运动，二者之间无外摩擦。因此，挤压力小，金属变形流动均匀，挤压速度快。但制品表面较正挤压差，外接圆尺寸较小，设备造价较高，辅助时间较长。

与其他加工工艺相比，冷挤压有如下优点：

(1) 节约原材料。冷挤压是利用金属的塑性变形来制成所需形状的零件，因而能大量减少切削加工，提高材料利用率。冷挤压的材料利用率一般可达到80%以上。

(2) 提高劳动生产率。用冷挤压工艺代替切削加工制造零件，能使生产率提高几倍、几十倍、甚至上百倍。

(3) 制件可以获得理想的表面粗糙度和尺寸精度。零件的精度可达IT7～IT8级，表面粗糙度可达$Ra0.2$～$Ra0.6$。因此，用冷挤压加工的零件一般很少再切削加工，只需在要求特别高之处进行精磨。

(4) 提高零件的力学性能。冷挤压后金属的冷加工硬化，以及在零件内部形成合理的纤维流线分布，使零件的强度远高于原材料的强度。此外，合理的冷挤压工艺可使零件表面形成压应力而提高疲劳强度。因此，某些原需热处理强化的零件用冷挤压工艺后可省去热处理工艺，有些零件原需要用强度高的钢材制造，用冷挤压工艺后就可用强度较低的钢材替用。

(5) 可加工形状复杂的，难以切削加工的零件。如异形截面、复杂内腔、内齿及表面看不见的内槽等。

(6) 降低零件成本。由于冷挤压工艺具有节约原材料、提高生产率、减少零件的切削加工量、可用较差的材料代用优质材料等优点，从而使零件成本大大降低。

2) 热挤压工艺

热挤压工艺是一种将金属在再结晶温度以上进行挤压，使管坯从一个模孔挤出，以得到模孔形状断面管材的金属成形方法。因此热挤压成形方法特别适合于各种合金钢、不锈钢、高强度钢、镍基高温合金等型材、管材的成形。这里以无缝钢管热挤压为例介绍。

无缝钢管的热挤压工艺过程为：首先在穿孔机上进行空心管坯制备，穿孔后空心管坯的温度已有所降低，进行再加热，温度升到1180～1250℃，达到塑性变形状态。加热后的管坯先经除鳞，然后在玻璃粉上滚动，黏上一层玻璃粉，起润滑和隔热的作用。管坯装入卧式挤压机的圆柱形挤压筒中。在挤压筒的底部装有挤压模和玻璃垫，在挤压杆内装有1根圆芯杆(亦称穿孔针)伸到模孔中，如图10.6所示。挤压杆进入挤压筒，通过挤压垫将管坯向模孔端挤压，随着施加的压力不断加大，先使管坯镦粗，消除管坯与挤压筒内壁之间的间隙，接着将其从模孔中挤出。在挤压过程中，处于管坯与挤压模之间的玻璃垫融化，覆盖在钢件的表面上充当了润滑剂。

挤出的无缝钢管的外径尺寸取决于模孔的内径大小，而芯杆与模孔之间的间隙决定钢管的厚度。一个挤压模通常可以连续使用多次。挤压完毕后，挤压筒向后移动一定距离，用台锯锯断。钢管冷却后收集，用吊车运到精整工段进行必要的热处理及精整处理。

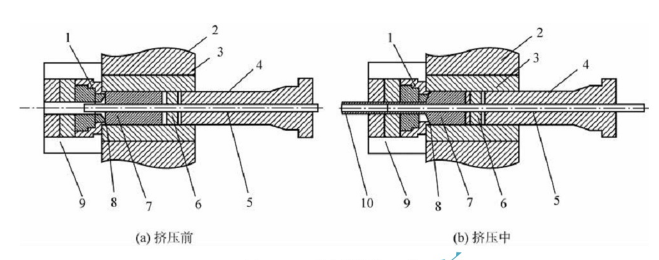


图 10.6　无缝钢管的挤压过程

1—模具；2—挤压筒；3—内衬；4—挤压杆；5—芯杆；6—挤压垫；
7—管坯；8—玻璃垫；9—模座；10—钢管

10.3　拉拔设备与工艺

1. 拉拔设备

拉拔设备主要有管棒型材拉拔机和拉丝机。

管棒材拉拔机的形式可以按拉拔装置分类，也可以按拉拔管棒材同时拉的根数分类。目前应用最广泛的是链式拉拔机，链式拉拔机具有操作简单，适应性强的特点，管、棒、型材皆可在同一台设备上拉拔等，是目前生产中应用的最为普遍的设备。根据链数的不同可将链式拉拔机分为单链拉拔机和双链拉拔机，如图 10.7 所示。



图 10.7　双链式拉拔机

链式拉拔机的拉拔力可达 4MN 以上，机身长度一般可达 50～60m，个别的达到 120m，拉拔速度通常是 120m/min，最高的已达 190m/min。链式拉拔机的缺点是生产的产品质量比较低，经常出现表面结疤、裂纹、弯曲等各种缺陷，后期还需要各种精整工序，为了解决这些问题，出现了联合拉拔机。

联合拉拔机将拉拔、矫直、切断、抛光和探伤组成在一起形成一个机列，可大大提高制品的质量和生产效率。用联合拉拔机列可生产棒材、管材和型材。机械化、自动化程度高，所需生产人员少，生产周期短，生产效率高，产品质量好。

拉丝机也被叫做拔丝机，是在工业应用中使用很广泛的机械设备。拉丝机按其用途可分为金属拉丝机、塑料拉丝机，竹木拉丝机等。金属拉丝机属于标准件等金属制品生产预加工设备，目的是为了把由钢材生产厂家送来的金属材料进行拉拔处理，使线材或棒材的

直径、圆度、内部金相结构、表面光洁度和矫直度都达到标准件等金属制品生产需要的原料处理要求。因此拉丝机对线材或棒材的预处理质量直接关系到标准件等金属制品生产企业的产品质量，拉丝机广泛应用于钢丝、制绳丝、预应力钢丝、标准件等金属制品的生产和预加工处理。图 10.8 为电线拉丝机工作的示意图，图 10.9 为一台卧式金属拉丝机。

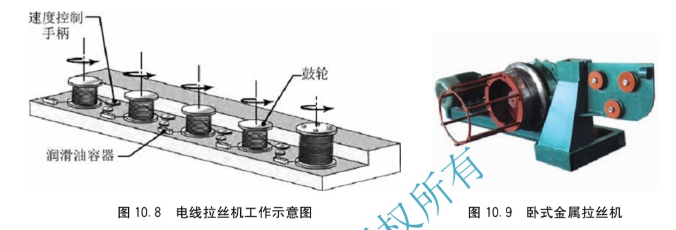


图 10.8　电线拉丝机工作示意图　　　图 10.9　卧式金属拉丝机

2. 拉拔工艺

拉拔工艺适用于连续高速生产断面尺寸小的长尺产品(铝、铜拉拔纤维直径可小至 10μm；不锈钢可小至 0.5μm)。按照原材料的不同，可以将拉拔工艺分成实心材拉拔和空心材拉拔两大类。实心材拉拔用于生产棒材、型材和线材。而空心材拉拔则用于生产管材和空心异型材。

拉拔制品的尺寸精度高，表面粗糙度低，工具与设备简单，维护方便，一机多用。

3. 拉拔-旋压联合工艺

采用拉拔或旋压工艺加工金属圆管已有 50 余年历史。旋压是将平板或空心坯料固定在旋压机的模具上，在坯料随机床主轴转动的同时，用旋轮或赶棒加压于坯料，使之产生局部的塑性变形。在旋轮的进给运动和坯料的旋转运动共同作用下，使局部的塑性变形逐步地扩展到坯料的全部表面，并紧贴于模具，完成零件的旋压加工。如图 10.10 所示。

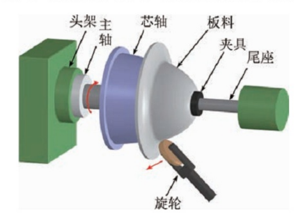


图 10.10　旋压加工示意图

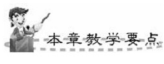
采用旋压工艺加工金属圆管(或圆锥管)可获得较好的表面质量，尤其适合硬度较大的金属材料；缺点是加工效率较低。采用拉拔工艺加工金属圆管虽然生产效率较高，但不适合变截面圆管的加工。

拉拔-旋压联合成形工艺是20世纪80年代国外发展起来的一种先进生产工艺，它结合了拉拔和旋压两种工艺的优点，在旋压的基础上加大轴向拉拔力，强化了金属塑性流变过程，提高了生产效率，同时不需要使用芯棒，降低了生产成本。该工艺尤其适合较长圆管或圆锥管(如旗杆、灯杆等)的加工。

思考及实践

1. 生活中有哪些金属制品是通过挤压和拉拔工艺生产的?
2. 为什么说磷化皂化法促进了金属拉拔工艺的产生和发展?
3. 什么是拉拔加工? 有何特点? 有哪些基本加工方法?
4. 有人说挤压、拉拔仅表现在对金属坯料施加外力的方向不同，你说对吗? 请说明之。
5. 有机会到钢丝厂或电缆厂参观，了解一下拉丝机和拉丝工艺过程。
6. 什么是旋压? 旋压和拉拔结合在一起有什么用处?

第11章 焊 接



知识要点	掌握程度	相关知识
焊接的历史和应用	了解焊接的发展史； 熟悉焊接工艺的应用； 掌握焊接的分类	焊接的发展史； 焊接工艺的应用； 焊接的分类
手工电弧焊	了解手工电弧焊的设备； 熟悉手工电弧焊的工艺	手工电弧焊工具； 手工电弧焊的工艺
气焊	了解气焊的设备； 熟悉气焊的特点和应用	气焊设备； 气焊的特点和应用
电阻焊	了解电阻焊的原理和分类； 熟悉点焊的设备和应用	电阻焊的原理和分类； 点焊的设备和应用
其他焊接方法	了解钎焊、埋弧焊和激光焊接的原理； 熟悉钎焊、埋弧焊和激光焊接的应用	钎焊、埋弧焊和激光焊接的原理； 钎焊、埋弧焊和激光焊接的应用

11.1 概　　述

焊接是一种常见的制造技术。当你路过建筑工地的时候，你大概见过火花四溅后，钢结构拔地而起；如果你愿意动手维修家用电器，锡焊就是你不可或缺的手段。

焊接技术的历史源远流长。中国商朝制造的铁刃铜钺，就是铁与铜的铸焊件，其表面铜与铁的熔合线碗蜒曲折，接合良好。春秋战国时期曾侯乙墓中的建鼓铜座上有许多盘龙，是分段钎焊连接而成的。战国时期制造的刀剑，刀刃为钢，刀背为熟铁，一般是经过加热锻焊而成的，如图 11.1 所示。古代焊接技术长期停留在铸焊、锻焊、钎焊和铆焊的水平上，使用的热源都是炉火，温度低、能量不集中，无法用于大截面、长焊缝工件的焊接，只能用来制作装饰品、简单的工具、生活器具和武器。


(a) 铁刃铜钺　　(b) 建鼓铜座　　(c) 战国刀剑

图 11.1　古代焊接的应用

现代的焊接起源于欧洲，大约有 250 年的历史。19 世纪初，英国的 H. 戴维斯发现电弧和氧乙炔焰两种能局部熔化金属的高温热源。1856 年，英格兰物理学家 James P. Joule 在对电流产生的热能进行了长期的实验性研究之后发现了电阻焊原理，并成功用电阻加热法对一捆铜丝进行了熔化焊接。1886 年，英国的 Elihu Thomson 造出了第一个焊接变压器并在来年为此项工艺申请了专利，此后，Thomson 又发明了点焊机、缝焊机、凸焊机以及闪光对焊机，后来点焊成为电阻焊最常用的方法，如今已广泛应用于汽车工业和对其他许多金属片的焊接上。大约在 1900 年，Edmund Fouche 和 Charles Picard 造出了第一支氧乙炔火焰的气焊焊炬，焊炬发出的火焰炙热，大约在 3100℃以上，使得焊炬成为了焊接切割钢材的重要工具。在 1881 年的巴黎“首届世界电器展”上，俄罗斯人 Nikolai Benardos 展示了一种电弧焊的方法。他在碳极和工件间打出一个弧，填充金属棒或填充金属丝可以送进这个电弧并熔化。

工业化的发展和两次世界大战的爆发对现代焊接的快速发展产生了影响。电阻焊、气焊和电弧焊都是在第一次世界大战前发明的，成为最基本的焊接方法。但 20 世纪早期，气体焊接切割在制造和修理工作中占主导地位。过些年后，电焊得到了同样的认可。

一般而言，焊接是通过加热或加压，使两个及两个以上分离的零件通过原子结合而形成永久性连接的方法。

焊接具有连接性能好、省工省料、成本低、质量轻等优点，因此被广泛应用于汽车制造、医疗机械、航空、家电、电子、玩具等行业。如图 11.2 所示为焊接的几种典型应用。

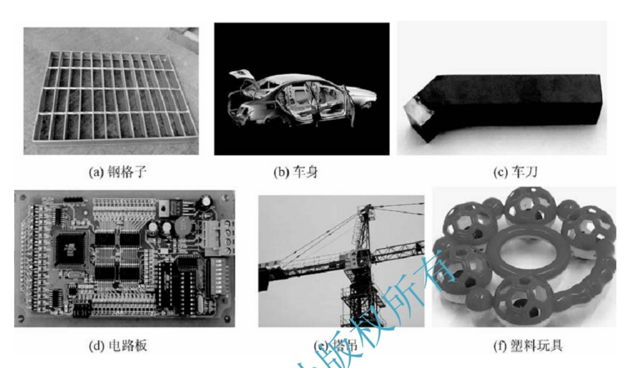


图 11.2　现代焊接的应用

按照焊接过程中金属材料所处的状态不同，目前把焊接方法分为熔焊、压力焊、钎焊三类。

(1) 熔焊：是指在焊接过程中，将焊件接头加热至熔化状态，不加压力完成焊接的方法。常用的焊接方法有电弧焊、气焊、电渣焊等。

(2) 压焊：焊接过程中，必须对焊件施加压力(加热或加压)，以完成焊接的方法称为压焊。常用的压焊方法有电阻焊、摩擦焊、旋转电弧焊、超声波焊等。

(3) 钎焊：是指采用比母材金属熔点低的金属材料作钎料，将焊件和钎料加热到高于钎料熔点、低于母材熔化温度，利用液态钎料润湿母材，填充接头间隙并与母材相互扩散实现连接焊件的方法。常用的钎焊方法有火焰钎焊、感应钎焊、炉中钎焊、盐浴钎焊和真空钎焊等。

11.2　手工电弧焊

手工电弧焊是用手工操纵焊条进行焊接的电弧焊方法，可以简称为手弧焊。焊条电弧焊设备简单，操纵灵活方便，但要求操作者技术水平较高，生产率低，劳动条件差。主要用于单件小批量生产中低碳钢、低合金结构钢、不锈钢的焊接和铸铁的补焊等。

1. 手弧焊工具

手弧焊工具有电焊机、电焊条、焊钳、面罩、清渣锤、钢丝刷、焊接电缆和劳动保护用品。其中，电焊机是主要设备，是焊接电弧的电源。电焊机分为直流焊机和交流焊机，其中，直流弧焊机供给焊接用直流电的电源设备，由于电流方向不随时间的变化而变化，因此电弧燃烧稳定，运行使用可靠，有利于掌握和提高焊接质量，如图 11.3 所示。

焊条是涂有药皮的供焊条电弧焊用的熔化电极。如图 11.4 所示，焊条由焊芯和药皮

两部分组成。焊芯是一根具有一定直径和长度、经过特殊冶炼的专用金属丝。压涂在焊芯表面上的涂料层，称为药皮。



图 11.3 直流弧焊机

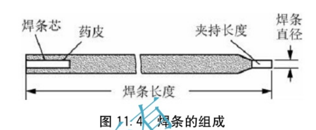


图 11.4 焊条的组成

焊芯起导电和填充金属的作用。焊芯用钢丝通常采用焊接专用钢丝。常用的焊芯直径为 2.5～6.0mm，长度为 350～450mm。药皮的主要作用是提高电弧燃烧的稳定性，保护焊接熔池，保证焊缝脱氧，去除进入熔池的硫磷杂质，为焊缝补充有益的合金元素。

2. 焊接工艺

如图 11.5 所示，焊接接头有对接、搭接、角接和 T 形接头等四种。其中，对接接头是各种焊接接头中应用最多的一种接头形式。

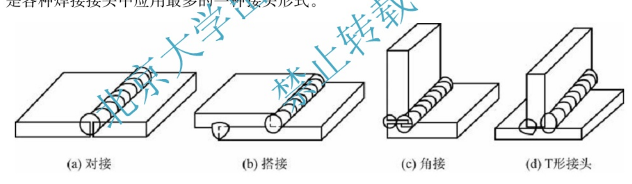


图 11.5 焊接的接头形式

为保证焊接，厚工件焊前需把接头边缘加工成一定形状，称为坡口。对接接头坡口形式，如图 11.6 所示。

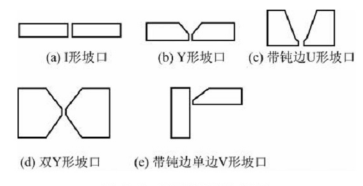


图 11.6 对接接头坡口形式

按焊缝的空间位置不同，焊接可分为仰焊、横焊、立焊和平焊，如图 11.7 所示。

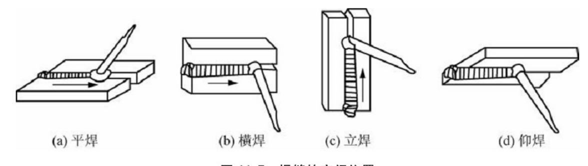


图 11.7　焊缝的空间位置

11.3　气　　焊

气焊是利用乙炔(C_2H_2)和氧气(O_2)混合燃烧时的高温火焰将焊件和焊丝熔化，进行焊接的一种方法，如图 11.8 所示。气焊与气割本质上不一样，气焊是熔化金属，气割是金属在纯氧中燃烧。

气焊设备由乙炔瓶(白色)和氧气瓶(蓝色)、氧气减压器、乙炔减压阀和焊炬等组成，如图 11.9 所示。其中，乙炔瓶是储存溶解乙炔的钢瓶，氧气瓶是储存氧气的一种高压容器钢瓶，减压器是将高压气体降为低压气体的调节装置。因此，其作用是减压、调压、量压和稳压。而焊炬是气焊时用于控制气体混合比、流量及火焰并进行焊接的手持工具。

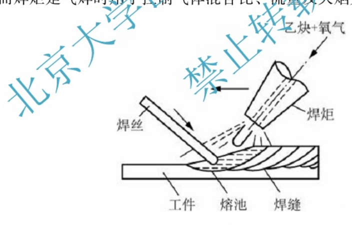


图 11.8　气焊原理图

气焊的特点及应用：

(1) 火焰对熔池的压力及对焊件的热输入量调节方便，故熔池温度、焊缝形状和尺寸、焊缝背面成形等容易控制。

(2) 设备简单，移动方便，操作易掌握，但设备占用生产面积较大。

(3) 焊距尺寸小，使用灵活，由于气焊热源温度较低，加热缓慢，生产率低，热量分散，热影响区大，焊件有较大的变形，接头质量不高。

(4) 气焊适于各种位置的焊接。适于焊接在 3mm 以下的低碳钢、高碳钢薄板、铸铁焊补以及铜、铝等有色金属的焊接。在船上无电或电力不足的情况下，气焊则能发挥更大的作用，常用气焊火焰对工件、刀具进行淬火处理，对紫铜皮进行回火处理，并矫直金属材料和净化工件表面等。此外，由微型氧气瓶和微型熔解乙炔气瓶组成的手提式或肩背式



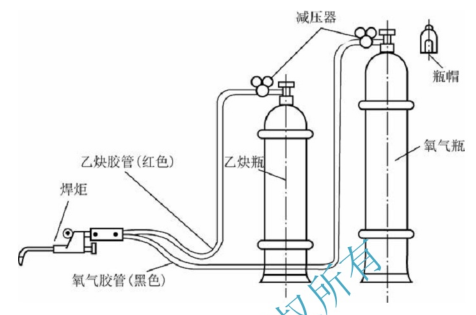


图 11.9 气焊设备及其连接

气焊气割装置，在旷野、山顶、高空作业中应用是十分简便的。



11.4 电 阻 焊

电阻焊是将被焊工件压紧于两电极之间，并施以电流，利用电流流经工件接触面及邻近区域产生的电阻热效应将其加热到熔化或塑性状态，使之形成金属结合的一种方法。

电阻焊是以电阻热为能源的一种焊接方法，焊接所需电阻热的产生遵守公式：$Q=I^2Rt$，而电阻 R 由电极与工件的接触电阻 R_{cw}、工件电阻 R_w 和工件与工件的接触电阻 R_c 组成：$R=2R_{cw}+R_w+R_c$，电阻点焊中的电阻组成如图 11.10 所示。

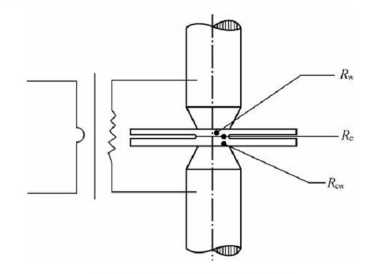


图 11.10 电阻点焊中的电阻组成

电阻焊可以分为点焊、缝焊、对焊和凸焊四种，点焊是将焊件装配成搭接接头，并压紧在两柱状电极之间，利用电阻热熔化母材金属，形成焊点的电阻焊方法。缝焊的过程与

点焊相似，只是以旋转的圆盘状滚轮电极代替柱状电极，将焊件装配成搭接或对接接头，并置于两滚轮电极之间，滚轮加压焊件并转动，连续或断续送电，形成一条连续焊缝的电阻焊方法。缝焊主要用于焊接焊缝较为规则、要求密封的结构，板厚一般在 3mm 以下。对焊则是使焊件沿整个接触面焊合的电阻焊方法。凸焊是点焊的一种变形形式，在一个工件上有预制的凸点，凸焊时，一次可在接头处形成一个或多个熔核。

下面以点焊为重点介绍一下电阻焊设备、工艺和应用。

点焊机是由机座，加压机构，焊接回路，电极，传动机构和开关及调节装置组成。加压机构是电阻焊在焊接是负责加压的机构。焊接回路是指除焊接之外参与焊接电流导通的全部零件所组成的导电通路。控制装置是由开关和同步控制两部分组成，在点焊中开关的作用是控制电流的通断，同步控制的作用是调节焊接电流的大小，精确控制焊接程序，当网路电压有波动时，能自动进行补偿，如图 11.11 所示。

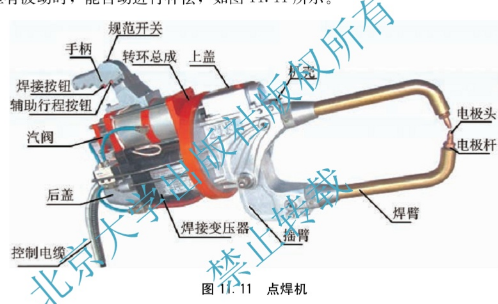


图 11.11　点焊机

点焊主要用于薄板焊接，在汽车车制造中广泛使用点焊进行车身焊接。如图 11.12 为车身点焊系统，采用多自由度的点焊机器人，动作非常灵活，有很好的避障性，尤其适合狭小空间、复杂位置的点焊作业，可以使机器人的布置非常紧凑。



图 11.12　车身点焊

11.5 其他焊接方法

1. 钎焊

钎焊是指用比母材熔点低的金属材料作为钎料，用液态钎料润湿母材和填充工件接口间隙并使其与母材相互扩散的焊接方法。钎焊变形小，接头光滑美观，适合于焊接精密、复杂和由不同材料组成的构件，如蜂窝结构板、航空发动机叶片、硬质合金刀具和印刷电路板等。钎焊前对工件必须进行细致加工和严格清洗，除去油污和过厚的氧化膜，保证接口装配间隙。间隙一般要求在 0.01～0.1mm。

根据钎料熔点的不同，将钎焊分为软钎焊和硬钎焊。软钎焊的钎料熔点低于 450℃，接头强度较低(小于 70 MPa)。多用于电子和食品工业中导电、气密和水密器件的焊接。以锡铅合金作为钎料的锡焊最为常用。硬钎焊的钎料熔点高于 450℃，接头强度较高(大于 200 MPa)。有的可在高温下工作。硬钎焊的钎料种类繁多，以铝、银、铜、锰和镍为基的钎料应用最广。铝基钎料常用于铝制品钎焊。银基、铜基钎料常用于铜、铁零件的钎焊。锰基和镍基钎料多用来焊接在高温下工作的不锈钢、耐热钢和高温合金等零件。

如果按照热源种类和加热方法的不同，钎焊可以分为火焰钎焊、炉中钎焊、感应钎焊、电阻钎焊、浸渍钎焊、气相钎焊、烙铁钎焊及超声波钎焊等。其中，最常见的是火焰钎焊和烙铁钎焊。

下面简单介绍铜管火焰钎焊施工工艺过程：

(1) 将铜管接头处外表及管件接头处内表面的氧化膜、油污等清理干净，如图 11.13(a)所示。

(2) 将铜管插入管件，插到底并旋转，以保持均匀间隙。

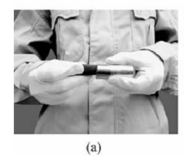
(3) 用气焊火焰对接头实施均匀加热直到加热到钎焊温度，此时的温度应约为650～750℃，被加热件的颜色为樱红色。

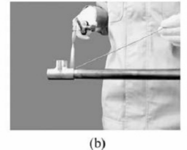
(4) 达到钎焊加热温度时送入钎剂。主要作用是清除母体材料和钎料表面氧化膜，紫铜管和黄铜件连接时需要加入钎剂，而紫铜管和紫铜配件连接不必加入钎剂。

(5) 用钎料来接触被加到高温的接头处，当铜管接头处的温度能使钎料迅速熔化时，表示接头处测试已达到钎焊温度，即可边加热边添加钎焊料直至将钎缝填满，形成焊缝。此时火焰不能直接对着焊料加热。如图 11.13(b)所示。

(6) 移去火焰，使接头在静止状态下冷却结晶。

(7) 将接头的残渣清理干净，焊件自然冷却。如图 11.13(c)所示。


(a)


(b)


(c)

图 11.13 铜管钎焊过程

2. 埋弧焊

埋弧焊是以电弧作为热源的机械化焊接方法，是生产效率较高的机械化焊接方法之一。由于电弧是在焊剂层下燃烧进行焊接的，因此，它的全称是埋弧自动焊，简称为埋弧焊。通常用英文简称 SAW(Submerged Arc Welding)表示。埋弧焊设备如图 11.14 所示。



图 11.14 埋弧焊设备

其工艺原理是，焊接电源接在导电嘴和工件之间用来产生电弧，焊丝由焊丝盘经送丝机构和导电嘴送入焊接区，颗粒状焊剂由焊剂漏斗经软管均匀地堆敷到焊缝接口区，焊丝及送丝机构、焊剂漏斗和焊接控制盘等通常装在一台小车上，以实现焊接电弧的移动。如图 11.15 所示。

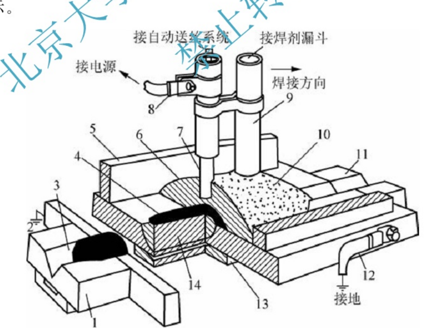


图 11.15 埋弧焊工作示意图

1—引弧板；2—接地线；3—焊件坡口；4—凝固的熔渣；5—焊剂挡块；6—焊丝；7—导电嘴；8—电缆接头；9—焊剂漏管；10—焊剂；11—引出板；12—母材；13—焊缝垫板；14—凝固的焊缝金属

埋弧焊时，连续送进的焊丝在一层可熔化的颗粒状焊剂覆盖下引燃电弧。当电弧热使焊丝、母材和焊剂熔化以致部分蒸发后，在电弧区便由金属和焊剂蒸气构成一个空腔，电

弧就在这个空腔内稳定燃烧。空腔底部是熔化的焊丝和母材形成的金属熔池，顶部则是熔融焊剂形成的熔渣。电弧附近的熔池在电弧力的作用下处于高速紊流状态，气泡快速溢出熔池表面，熔池金属受熔渣和焊剂蒸气的保护不与空气接触。随着电弧向前移动，电弧力将液态金属推向后方并逐渐冷却凝固成焊缝，熔渣则凝固成渣壳覆盖在焊缝表面。焊接时焊丝连续不断地送进，其端部在电弧热作用下不断的熔化，焊丝送进速度和熔化速度相互平衡，以保持焊接过程的稳定进行。依据应用场合和要求的不同，焊丝有单丝、双丝和多丝，有的应用中还以药芯焊丝代替裸焊丝，或用钢带代替焊丝。

埋弧焊具有生产效率高、焊缝质量高、劳动条件好等优点。熔渣隔绝空气的保护效果好，焊接参数可以通过自动调节保持稳定，对焊工技术水平要求不高，焊缝成分稳定，机械性能比较好。除了减轻手工焊操作的劳动强度外，它没有弧光辐射，这是埋弧焊的独特优点。近年来，虽然先后出现了许多种高效、优质的新焊接方法，但埋弧焊的应用领域依然未受任何影响。从各种熔焊方法的熔敷金属重量所占份额的角度来看，埋弧焊约占10%左右，且多年来一直变化不大。

埋弧焊的主要缺点有：

（1）埋弧焊采用颗粒状焊剂进行保护，一般只适用于平焊和平角焊位置的焊接，其他位置的焊接，则需采用特殊装置来保证焊剂对焊缝区的覆盖和防止熔池金属的漏淌。

（2）焊接时不能直接观察电弧与坡口的相对位置，需要采用焊缝自动跟踪装置来保证焊炬对准焊缝不焊偏。

（3）埋弧焊使用电流较大，电弧的电场强度较高，电流小于100A时，电弧稳定性较差，因此不适宜焊厚度小于1mm的薄件。

埋弧焊目前主要用于焊接各种钢板结构。可焊接的钢种包括碳素结构钢、不锈钢、耐热钢及其复合钢材等。埋弧焊在造船，锅炉，化工容器，桥梁，起重机械，冶金机械制造业，海洋结构，核电设备中应用很广泛。

3. 激光焊接

激光焊接是一种新型的非接触焊接，其加工原理是：利用高能量的激光脉冲对材料进行微小区域内的局部加热，激光辐射的能量通过热传导向材料的内部扩散，将材料熔化后形成特定熔池。激光焊接具有焊接速度快、能量密度高、灵活性大，可精确控制，穿透能力强，焊缝的深度比大，热输入量低，焊接变形小，特别适合于精密结构件和热敏感器件的焊接。

激光焊接在汽车、医疗和集成电路制造等领域有广泛的应用。比如患者视网膜脱落，就可用激光透过眼球焊到眼球后面，就可以使脱落的网膜和眼球焊到一起。

车身采用激光拼焊板技术，可以将几块不同材质、不同厚度、不同涂层的钢材焊接成一块整体板，再冲压设备落料、拉延、冲孔、整形而形成冲压件，从而达到不同承载不同板厚的设计要求。采用激光拼焊板技术，焊缝宽度不超过0.5～1mm，不但能降低车辆的制造成本和重量，而且可以大大提高车身抗碰撞能力，最新型的钢制车身结构中，50%采用了拼焊板制造。

在白车身焊接中，激光焊接主要用于车身框架结构的焊接，如顶盖与侧面车身的焊接。在使用激光焊接技术之前均采用点焊，因此会出现15mm的接缝。大众的最新车型采用了激光钎焊，彻底消除了接缝。由于可以省去镶边，所以每辆汽车可以削减14欧元的

成本，同时，由于工件连接之间的接合面宽度可以减少，因此，既可降低板材的使用量，也能提高车体的刚度。如图11.16所示，为车门的拼焊板技术，实现了不同厚度钢板的精密焊接。

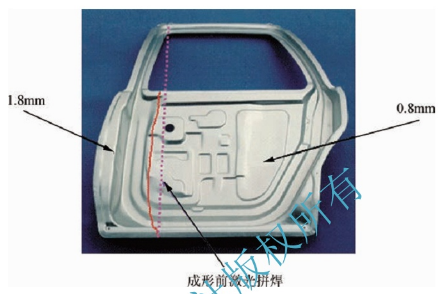


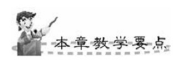
图11.16 激光拼焊板

但是，采用激光焊接对冲压件的要求很高，要求平整度控制在0.2mm之内。激光焊接技术包含光、机、电、通信等技术，这对维修人员素质的要求也比较高，价格比较贵，因此要求的一次性投资比较大。

思考及实践

1. 到学校实习工厂参观，了解手工电弧焊的设备和工艺，注意安全防护。
2. 请你自己查资料，了解一下如下焊接英文缩语的含义：MAG，MIG，GMAW，SAW。
3. 钎焊有哪些应用？
4. 埋弧焊生产效率高而且改善了劳动条件，为什么使用面却不是很广？
5. 气焊除了焊接之外，还有哪些应用？
6. 激光焊接有什么优势？

第12章 粉末冶金



知识要点	掌握程度	相关知识
粉末冶金的概念和应用	掌握粉末冶金的概念； 了解粉末冶金的历史； 熟悉粉末冶金的应用	粉末冶金的概念； 粉末冶金的历史； 粉末冶金的应用
粉末冶金工艺过程	了解粉末冶金的工艺过程； 熟悉粉末压制和坯块烧结两个关键工序	粉末制备、预处理、粉末压制和坯块烧结
金属注射成形	了解金属粉末注射成形的特点； 了解金属粉末注射成形的工艺过程	金属粉末注射成形的特点； 金属粉末注射成形的工艺过程

12.1 概　　述

粉末冶金是制取金属粉末或用金属粉末(或金属粉末与非金属粉末的混合物)作为原料，经过成形和烧结，制造金属材料、复合材料以及各种类型制品的工艺技术。

粉末冶金的应用其实由来已久。人们很早就采用机械粉碎法制得金、银、铜和青铜的粉末，用作陶器等的装饰涂料。1909 年，美国库利吉(W. D. Coolidge)采用钨粉压制、重熔、旋锻、拉丝工艺制成钨丝，这是现代粉末冶金的开始。到 1910 年左右，人们已经用粉末冶金法制造了钨钼制品、硬质合金、青铜含油轴承、多孔过滤器、集电刷等，逐步形成了整套粉末冶金技术。20 世纪 30 年代，旋涡研磨铁粉和碳还原铁粉问世后，用粉末冶金法制造铁基机械零件获得了很快的发展。第二次世界大战后，粉末冶金技术发展迅速，新的生产工艺和技术装备、新的材料和制品不断出现，开拓出一些能制造特殊材料的领域，成为现代工业中的重要组成部分。

粉末冶金工艺具有传统熔铸工艺所无法获得的独特的化学组成和物理、力学性能。能够大量节约材料、无切削、少切削，普通铸造合金切削量在 30%～50%，粉末冶金产品可少于 5%。能够大量节省能源，大量节省劳动，能够制备其他方法不能制备的材料，制备其他方法难以生产的零部件。

粉末冶金技术可以广泛用于制造以下各种材料(图 12.1)：

(1) 粉末冶金减摩材料。通过在材料孔隙中浸润滑油或在材料成分中加减摩剂或固体润滑剂制得。广泛用于制造轴承、支承衬套或作端面密封等。

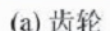
(2) 粉末冶金多孔材料。又称多孔烧结材料。材料内部孔道纵横交错、互相贯通，一般有 30%～60%的体积孔隙度，孔径 1～100μm。透过性能和导热、导电性能好，耐高温、低温，抗热震，抗介质腐蚀。用于制造过滤器、多孔电极、灭火装置、防冻装置等。

(3) 粉末冶金结构材料。又称烧结结构材料。能承受拉深、压缩、扭曲等载荷，并能在摩擦磨损条件下工作。比如汽车发动机中的曲轴、连杆、主轴承盖、凸轮轴、链轮、气门导杆等。

(4) 粉末冶金工模具材料。包括 硬质合金、粉末冶金高速钢等。后者组织均匀，晶粒细小，没有偏析，比熔铸高速钢韧性和耐磨性好，热处理变形小，使用寿命长。可用于制造切削刀具、模具和零件的坯件。

(5) 粉末冶金电磁材料。包括电工材料和磁性材料。用于制造各种转换、传递、储存





(a) 齿轮



(b) 刹车片



(c) 刀片

图 12.1　粉末冶金的应用

能量和信息的磁性器件。

（6）粉末冶金高温材料。包括粉末冶金高温合金、难熔金属和合金、金属陶瓷 、弥散强化和纤维强化材料等。用于制造高温下使用的涡轮盘、喷嘴、叶片及其他耐高温零部件。

12.2 粉末冶金工艺过程

粉末冶金工艺过程和与生产陶瓷有相似的地方，粉末冶金也可以用于陶瓷的成形加工。其基本工序是如图 12.2 所示。

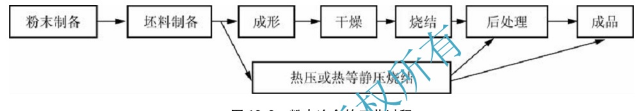


图 12.2 粉末冶金的工艺过程

制约粉末冶金工业发展的两个主要因素是粉末材料和粉末冶金的专用设备。

1. 金属粉末的制备

金属粉末是指尺寸小于 1mm 的金属颗粒群。包括单一金属粉末、合金粉末以及具有金属性质的某些难熔化合物粉末，是粉末冶金的主要原材料。粉末的大小、形状都会影响其流动性、压缩性，甚至会影响最终的产品性能。

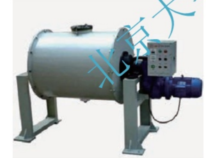


图 12.3 球磨机外形

现有的制粉方法可以分为机械法、物理法和化学法。不同的方法会产生不同的粉末形状，雾化法常得到球形粉末，还原法则可以制备多孔粉末，电解法则易于产生树枝状的粉末，片状粉末常通过研磨法获得。

（1）机械法是指通过机械破碎、研磨或气流研磨方法将大块材料或粗大颗粒细化的方法。

如图 12.3 所示为一台滚筒球磨机在滚筒内有很多钢球，在电机的驱动下，滚筒产生旋转，钢球也会产生运动，形成对原料的冲击、研磨等作用。转速太高或太低都不利于粉末的破碎，如图 12.4 所示。

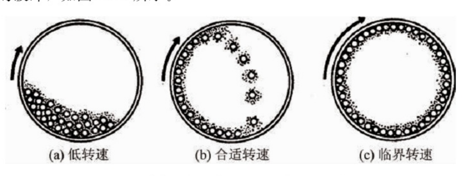


图 12.4 球磨机内钢球和物料随转速不同的状态

图 12.5 为一台振动球磨机示意图，偏心轴和弹簧的作用是将马达的驱动力转换为激振力。实际设备中常采用激振器产生的高频圆振动，使磨机内的研磨介质产生由高速自转和低速公转组合的高强度旋转冲击运动。这种复合运动对物料形成强力冲击破碎和研磨作用，一般可将物料研磨到微米级、粒度分布范围窄。振动球磨的钢球用量大大多于滚动球磨。

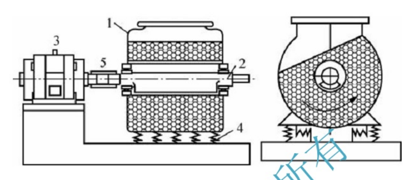


图 12.5　振动磨机结构示意图

1—筒体；2—偏心轴；3—马达；4—弹簧；5—弹性联轴节

（2）物理法是指采用气体雾化或水雾化的方法使材料的聚集状态发生改变，获得粉末。

物理法制备的原理是金属或合金先由电阻炉或感应电炉融化，再注入金属液中间包内。金属液由上方孔流出时液流与沿一定角度高速射击的气体或水相遇，然后被击碎成小液滴，随着液滴与气体或水流的混合流动，液滴的热量被雾化介质迅速带走，使液滴在很短的时间内凝固成为粉末颗粒。

气体雾化适合制备锡、铅、铝、铜、铁、不锈钢、合金钢等粉末；水雾化则适合制备铜、铁、黄铜、青铜、合金钢等粉末。图 12.6 为水雾化装置示意图。

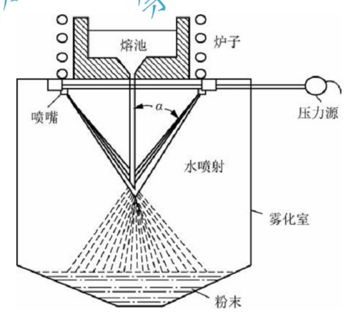


图 12.6　水雾化装置示意图

气雾化容易获得球形粉末，水雾化获得粉末表面张力较小的呈土豆状或不规则形状。

（3）化学法是指依靠化学反应或电化学反应过程，生成新的粉态物质。

气相还原法常见的有氢气还原法和碳还原法。比如：用 H_2 还原出 W 的化学反应过程为

$$WO_3 + H_2 \rightarrow WO_2 + H_2O \tag{12-1}$$

$$WO_2 + 2H_2 \rightarrow W + 2H_2O \tag{12-2}$$

碳还原法则是用 CO 作为还原剂，常用于铁粉的制备，其化学反应为

$$Fe_3O_4 + 4CO = 3Fe + 4CO_2 \tag{12-3}$$

2. 金属粉末的预处理

金属粉末在压制成形之前还需要进行退火、筛分、制粒、混合等预处理。退火的作用主要是还原氧化物、消除加工硬化、钝化金属，防止自燃、消除杂质，提高纯度。筛分是把颗粒大小不匀的原始粉末进行分级，使粉末能够按照粒度分成大小范围更窄的若干等级，常用的设备是振动筛分机，采用的筛子是标准筛，如图 12.7 所示。制粒是将小颗粒的粉末制成大颗粒或团粒的工序，常用来改善粉末的流动性。混合是将两种或两种以上不同成分的粉末均匀混合的过程。有时需将成分相同而粒度不同的粉末进行混合，称为合批。

3. 粉末压制成形

压制成形的目的是制得一定形状和尺寸的压坯，并使其具有一定的密度和强度。成形的方法基本上分为加压成形和无压成形。加压成形中应用最多的是模压成形。采用的设备为压力机，类似于板料冲压设备。近年来，由于高精度、高强度、复杂形状零件产量在粉末冶金零件中所占比重增加，并将逐渐占主导地位，对粉末冶金压力机的压制精度和性能提出了更高的要求，如图 12.8 所示为一台国产数控粉末冶金成形机。



图 12.7　振动筛分机



图 12.8　国产数控粉末冶金成形机

金属粉末压制成形的主要功能主要包括：

（1）将粉末成形为所要求的形状；

（2）赋予坯体以精确的几何形状与尺寸，应考虑烧结时的尺寸变化；

（3）赋予坯体要求的孔隙度和孔隙类型；

（4）赋予坯体以适当的强度，以便搬运。

采用封闭钢模压制成形的工序包括：称粉、装粉、压制、保压及脱模。称粉既可以采用人工操作天平的方式，也可以采用设备自动计量的方法，根据零件的重量(考虑一定的损失)称好粉末后装入模具中，在压力机的作用下进行压制，并保压一定的时间增强胚体的强度，然后依靠压力机和模具的协调作用将胚体从模具中顶出来，即实现脱模。

压制过程可分为四个阶段，首先粉末颗粒移动，孔隙减小，颗粒间相互挤紧；接着，粉末挤紧，小颗粒填入大颗粒间隙中，颗粒开始有变形；然后，粉末颗粒表面的凹凸部分被压紧且啮合成牢固接触状态；最后，粉末颗粒加工硬化到了极限状态，进一步增高压力，粉末颗粒被破坏和结晶细化。

4. 坯块的烧结

烧结是将压坯置于基体金属熔点以下温度加热保温，粉末颗粒之间产生原子扩散、固溶、化合和熔接，致使压坯收缩并强化。其内在机理是粉末在热激活状态下，表面能降低，导致空隙减小，密度增大，强度增加。

烧结是粉末冶金工艺中的关键性工序，其目的是依靠热激活作用，原子发生迁移，粉末颗粒形成冶金结合，提高烧结体的强度。成形后的压坯通过烧结使其得到所要求的最终力学性能。除普通烧结外，还有松装烧结、熔浸法、热压法等特殊的烧结工艺。

影响烧结效果的主要因素有：烧结温度、保温时间、加热和冷却速度。

5. 产品的后序处理

烧结后的处理，可以根据产品要求的不同，采取多种方式，如精整、浸渍、机加工、热处理及电镀。此外，近年来一些新工艺如轧制、锻造也应用于粉末冶金材料烧结后的加工，取得较理想的效果。

浸渍是利用烧结件多孔性的毛细现象浸入各种液体，提高产品的润滑性能。表面冷挤压则可以提高零件的尺寸精度和减小表面粗糙度。切削加工可以加工横槽、横孔，以及轴向尺寸精度更高的表面等。热处理可提高铁基制品的强度和硬度。表面保护处理对用于仪表、军工及有防腐要求的粉末冶金制品很重要。

12.3 金属注射成形

金属注射成形(Metallic Injection Moulding，简称 MIM)是将粉末冶金和塑料成形工艺相结合而发展起来的金属零件制造新技术，1973 年由美国加州 Parmatech 公司的航天燃料专家 Wiech 博士发明后，如今已成为世界粉末冶金领域发展最快的高新技术。由于该技术的独特优点和先进性，被美国列为不对外扩散技术加以保密，直到 1985 年才向全世界公布这一技术，而在这期间美国国内的 MIM 技术得以成熟并迅速发展形成产业化。如今，在大批量制造小型复杂精密金属零件方面有重要应用。

MIM工艺的成品密度高，原因是使用微细粉末。MIM使用的原料粉末粒度直径为2～15μm，而传统粉末冶金的原料粉末粒度为50～100μm。MIM工艺具有传统粉末冶金工艺的优点，但是形状自由度是传统粉末冶金所不能达到的，可以形成精密的三维复杂零件。

采用金属注射成形方法生产金属零件的流程，如图12.9所示。

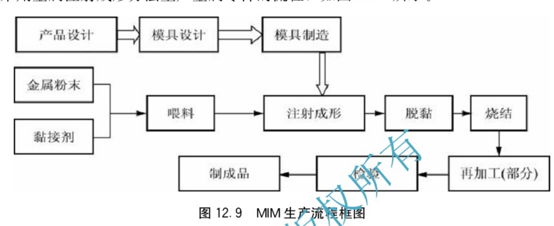


图12.9　MIM生产流程框图

MIM的主要工艺过程如下：

1）混料

将大约60%的金属粉末与40%的黏结剂混合成均质的喂料，混料主要采用挤出机，如图12.10所示。

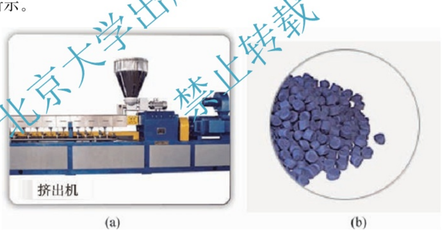


图12.10　挤出机中混料

2）注射成形

将喂料置入注射成形机进行注射成形(图12.11)，此过程类似注塑加工。零件的形状和结构在模具中成形。

3）脱黏过程

运用物理或者化学方法脱除零件中的黏结剂(图12.12)，零件由金属粉末与黏结剂的混合物变为单纯的金属零件，体积发生收缩，形状和结构不变。

4）烧结过程

将零件致密化处理，体积进一步收缩，形状和结构不变，此时相对密度≥95%(图12.13)。



图 12.11 注射成形

图 12.12 脱黏过程

图 12.13 烧结过程

思考及实践

1. 粉末冶金适合加工什么样的产品？请你列举出几种典型的汽车粉末冶金零件。
2. 粉末冶金的核心三部曲是什么？各有什么作用？

3. 粉末冶金工艺和陶瓷加工有什么异同点？

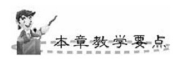
4. 有机会到粉末冶金企业去参观，实际观察粉末冶金的工艺过程和产品。

5. 为什么金属粉末的流动性、压缩性、成形性等性能特点和金属粉末的粒度、形状有关呢？请你自己动手玩沙子来理解。

6. MIM 和塑料注射成形工艺相比有什么异同点？



第13章 金属切削加工



知识要点	掌握程度	相关知识
金属切削加工概述	掌握金属切削加工的概念； 了解金属切削加工的历史； 熟悉金属切削加工的应用	金属切削加工的概念； 金属切削加工的历史； 金属切削加工的应用
金属切削刀具	掌握金属切削刀具材料的性能和种类； 熟悉常用金属切削刀具与砂轮	金属切削刀具材料的性能和种类； 常用金属切削刀具与砂轮
金属切削机床	了解金属切削机床的发展史； 熟悉车床、铣床和磨床的结构和应用	金属切削机床的发展史； 车床、铣床和磨床
机床夹具	熟悉夹具的作用； 熟悉夹具的组成和分类； 了解定位和夹紧； 了解典型钻床夹具	夹具的作用； 夹具的组成和分类； 定位和夹紧； 典型钻床夹具
切削加工过程	了解切屑的形成和种类； 了解积屑瘤的形成和规律； 了解切削力、切削热和刀具磨损； 了解切削用量的选择	切屑的形成和种类； 积屑瘤的形成和规律； 切削力、切削热和刀具磨损； 切削用量的选择
切削加工质量	熟悉切削加工质量的概念； 了解加工精度和表面质量的内涵和影响因素	加工精度； 表面质量
典型零件的机械加工工艺	了解机械加工工艺过程的概念	机械加工工艺过程的概念； 一般台阶轴的加工工艺



13.1 概　　述

看似柔软的纸张，能割破人的手指；而看似锋利的“刀山”，杂技师却能毫发无损地攀登而上。大家是否知道其中的奥秘？纸张之所以能够切割手指，是因为纸张和手指之间有相对运动，形成了“切割”。而钢刀却和赤脚相对静止，没有形成“切削”。不管怎样，还是要赞叹杂技师敢上“刀山”的勇气和善上“刀山”的智慧。

金属切削加工是指利用刀具将毛坯上多余的金属材料切除，从而使工件达到规定精度和表面质量的机械加工方法。为了切除多余的金属，刀具和工件之间必须有相对运动，即切削运动。以车床上切削加工圆柱面为例，主运动为工件的旋转运动，速度为 v_c，进给运动为车刀的连续直线运动，速度为 v_f，如图 13.1 所示。

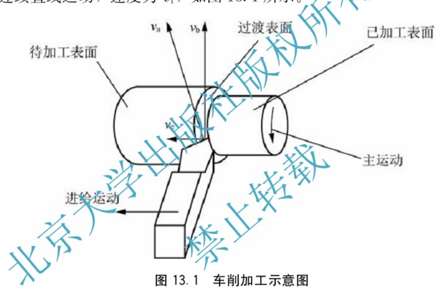


图 13.1　车削加工示意图

在切削加工和金属切削加工方面，我国有着悠久的历史。据考古发现，春秋时代的青铜刀、锯、锉的结构和形状，已经类似于现代的切削工具，它们的加工对象已经不限于非金属材料，而包括了金、银、铜等金属材料。而到了近代(1750～1900)，切削技术在欧洲获得了发展。机械工程和切削加工的发展，是和从英国开始的工业革命密切相关的。当时，蒸汽机的出现和纺织工业、采矿工业、军事工业的兴起，对加工技术不断提出新的要求．每一种新产品的发明和设计，必须解决相应的加工技术，才能付诸实现。社会的需要，推动着机械制造(包括切削加工)技术迅速提高。最早的蒸汽机在很大的程度上是用手工方法加工出来的。

在近代切削加工史上，美国的 F W Taylor 是一位贡献巨大的人物，他在 1898 年发明了高速钢，用这种材料制作的刀具具有高硬度、高耐磨性和高耐热性，俗称“锋钢刀”。在多年的金属切削实验的基础上，Taylor 在 1907 年提出了沿用至今的刀具寿命公式。Taylor 还是“科学管理之父”，他的《科学管理原理》著作对于今天的制造企业管理仍然有重要价值。

切削加工的基本方法有车削、铣削、磨削、刨削等多种。近 30 年来，尽管各种其他的金属加工方法如雨后春笋般地出现，但切削加工仍然是金属加工的主要工艺，而且朝着

速度更高、质量更好的方向不断发展。图 13.2 列出了采用金属切削加工方法制造出来的汽车零件，轴承和曲轴的毛坯为锻件，而铝合金轮毂的毛坯为铸件。


(a) 轴承　(b) 曲轴　(c) 轮毂

图 13.2　经切削加工的汽车零件

13.2　金属切削刀具

刀具的发现和切削加工的应用，在人类历史上具有十分重要的意义。历史学家认为，刀和火的发现和应用是两项伟大的发明，它是人类登上历史舞台的重要标志。

1. 金属切削刀具材料性能要求

切削中用到的刀具多种多样，常见的金属切削刀具有车刀、铣刀、麻花钻、砂轮、锯条等。不管形状如何，都需具备如下特性，才有应用价值：首先，要有足够的强度、硬度，才能不易损坏；第二，刀刃要有适当的角度，才能在刀刃与材料的接触位置产生足够大的压强，将材料切下来；第三，要有高的耐磨性和红硬性，才能长时间地在较高的切削温度下连续工作。

2. 被加工材料对刀具的要求

生活中，我们有这样的常识，加工软材料就像切肉，要用利刀(尖刀)；而加工硬材料就像剁骨头，要用钝刀。如果用钝刀切肉就会切不动，而用利刀剁骨头则会崩刃。原因是，软材料变形抗力小，容易导致“黏刀”，而硬材料变形抗力大，容易导致“伤刀”。

3. 金属加工刀具材料分类

(1) 碳素工具钢和合金工具钢：此类材料的特点是造价低廉，仅用于制造一些手用工具。最常用的碳素工具钢牌号为 T10A。

(2) 高速钢：此类材料的特点是刀具制造工艺性好，适用于制造各种复杂刀具，且造价相对亦较低廉。包括普通高速钢、高性能高速钢和粉末冶金高速钢。最常见的普通高速钢牌号为 W18Cr4V。

(3) 硬质合金：硬质合金是金属碳化物粉末用钴、钼、镍等作黏结剂烧结而成的粉末冶金制品。红硬性及许用切削线速度远远超过高速钢。目前正被广泛应用于机械加工业。常用的硬质合金有钨钴类(YG 类)，钨钛钴类(YT 类)和通用硬质合金类(YW 类)三类。

切削有色金属和铸铁常用 YG 类硬质合金，如 YG8；切削碳钢常用钨钛钴类硬质合金，如 YT15。

(4) 陶瓷材料：常见有 Al_2O_3、Al_2O_3-TiC、Si_3N_4 等系列产品。陶瓷材料的红硬性特别好。但强度和韧性略差。制造工艺性也较差。可用于高硬度材料的加工，如冷硬铸铁和冷硬模具钢。

(5) 人造金刚石(PCD)：是高温高压下石墨转化而来，是目前为止已知最硬的物质，能用于硬质合金、陶瓷、高硅铝等高硬度高耐磨材料的加工，又可用于有色金属及其合金、硬橡胶、石墨等的加工。但不能用于铁族材料。PCD 工艺性差。800℃ 即会碳化。

(6) 立方氮化硼(CBN)：用类似 PCD 的手段处理氮化硼所得，硬度仅次于 PCD，可耐高温 1400℃，用于淬硬钢、冷硬铸铁、高温合金球量铸铁的加工。

4. 常用金属切削刀具与砂轮

1) 车刀

车刀是金属切削加工中应用最广泛的一种刀具，可以用来加工内外圆、端面、螺纹及各种内外回转成形面，也可以用于切断、切槽等。车刀结构形式有硬质合金焊接式车刀、硬质合金机夹重磨式车刀、机夹可转位式车刀。硬质合金机夹重磨式车刀的刀片可卸下重磨，刀杆可重复使用；机夹可转位式车刀的刀片不需要重磨，转位使用，磨钝后换新刀片。

车刀一般由刀头和刀体两部分组成。刀头用于切削，刀体用于安装。刀头一般由三面，两刃、一尖组成。如图 13.3 所示，前刀面是切屑流经过的表面。主后刀面是与工件切削表面相对的表面。副后刀面是与工件已加工表面相对的表面。主切削刃是前刀面与主后刀面的交线，担负主要的切削工作。副切削刃是前刀面与副后刀面的交线，担负少量的切削工作，起一定的修光作用刀尖是主切削刃与副切削刃的相交部分，一般为一小段过渡圆弧。

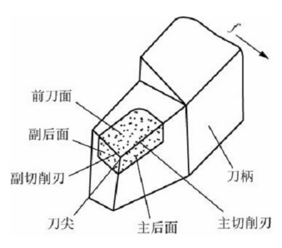


图 13.3　车刀的组成示意图

车刀按用途可分外圆车刀、切断刀、镗孔刀、成形车刀等，如图 13.4 所示。

2) 铣刀

铣刀是用于铣削加工的、具有一个或多个刀齿的旋转刀具。工作时各刀齿依次间歇地

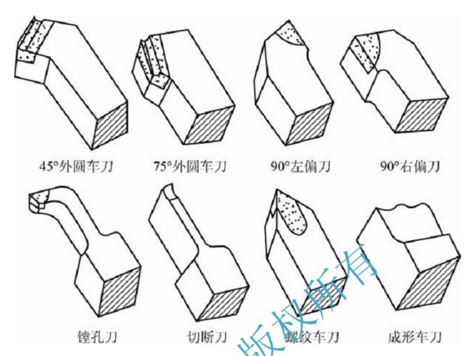


图 13.4 车刀的种类和用途

切去工件的余量。铣刀主要用于在铣床上加工平面、台阶、沟槽、成形表面和切断工件等。按其用途的不同，铣刀具有面铣刀、立铣刀、锯片铣刀等多种形式，如图 13.5 所示。

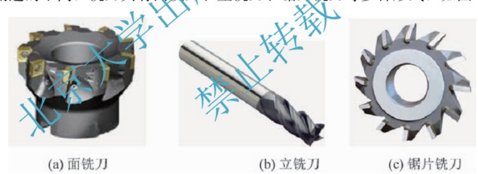

(a) 面铣刀 (b) 立铣刀 (c) 锯片铣刀

图 13.5 常见的铣刀

3）麻花钻

麻花钻是通过其相对固定轴线的旋转切削以钻削工件的圆孔的工具，如图 13.6 所示。因其容屑槽成螺旋状而形似麻花而得名。螺旋槽有 2 槽、3 槽或更多槽，但以 2 槽最为常见。麻花钻可被夹持在钻床、铣床、车床乃至加工中心上使用。钻头材料一般为高速工具



图 13.6 麻花钻

钢或硬质合金。

4）拉刀

拉刀是用于拉削的成形刀具。刀具表面上有多排刀齿，各排刀齿的尺寸和形状从切入端至切出端依次增加和变化。当拉刀作拉削运动时，每个刀齿就从工件上切下一定厚度的金属，最终得到所要求的尺寸和形状。拉刀常用于成批和大量生产中加工圆孔、花键孔、键槽、平面和成形表面等，如图 13.7 所示，生产率很高。拉刀按加工表面部位的不同，分为内拉刀和外拉刀；按工作时受力方式的不同，分为拉刀和推刀。推刀常用于校准热处理后的型孔。


(a) 圆孔拉刀　(b) 平面拉刀

图 13.7　圆孔拉刀和平面拉刀

5）铰刀

铰刀是具有一个或多个刀齿、用以切除已加工孔表面薄层金属的旋转刀具，具有直刃或螺旋刃的旋转精加工刀具，用于扩孔或修孔，如图 13.8 所示。



图 13.8　铰刀

13.3　金属切削机床

在 18 世纪中叶以前，工程结构所用的材料主要是木材，当时切削加工所用的机床多数是木制的。在此之后，由于工业革命的推动，金属切削机床迅速发展。大约经过 100 年

的努力，完成了金属切削机床的革命，解决了各种各样加工问题。1750 年，法国人西奥(Thiout A)在车床上装了一个刀架，用丝杠驱动纵向进给，比过去用手握持车刀进给前进了一大步。1770 年，英国人拉姆斯登(Rarasden J)首先在车床上车制螺丝。1818 年，美国人惠特奈(W hitney E)发明了铣床，用单齿铣刀进行工作。1829 年，苏格兰人内斯密斯(Nasmyth J)制成了分度铣床，1836 年，他又发明了刨床。1835 年，英国人惠特沃思(Whitworlh S J)设计了第 1 次由丝杠同时驱动纵向和横向进给的车床。1855 年，美国的罗宾斯和劳伦斯公司(Robbins & L aw renee)制造出转塔车床，可装 8 把刀具，轮流进行 8 道工序的加工。1865 年，在巴黎举行的国际博览会上，展出了各种各样品种齐全的金属切削机床，标志着机床和切削加工已经发展到一个崭新的历史阶段。此后，在 1892 年，美国人诺顿(NortonW P)发明了用手柄换挡的变速箱，这是机床变速机构的一次重要变革，这种变速机构很快被应用到各种机床上。从十九世纪末到二十世纪初，各种机床相继出现。1887 年美国人格兰特(Grant G B)发明滚齿机，1890 年出现了立式镗床，1895 年发明伞齿刨床。1908 年，泰勒(Taylor F W)发明齿轮磨床。1910 年，万能铣床已经基本完善。1912 年，制成坐标镗床。下面简单介绍一下车床、铣床和磨床这三种常见的金属切削机床。

1. 车床

车床是主要用车刀对旋转的工件进行车削加工的机床。在车床上还可用钻头、扩孔钻、铰刀、丝锥、板牙和滚花工具等进行相应的加工。如图 13.9 所示，车床的主要组成部件有：主轴箱、进给箱、溜板箱、刀架、尾架、光杠、丝杠、床身、床脚和冷却装置。

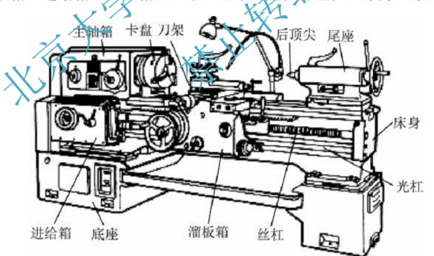


图 13.9 普通车床的结构

主轴箱又称床头箱，它的主要任务是将主电机传来的旋转运动经过一系列的变速机构使主轴得到所需的正反两种转向的不同转速，同时主轴箱分出部分动力将运动传给进给箱。主轴箱中等主轴是车床的关键零件。主轴在轴承上运转的平稳性直接影响工件的加工质量，一旦主轴的旋转精度降低，则机床的使用价值就会降低。

进给箱又称走刀箱，进给箱中装有进给运动的变速机构，调整其变速机构，可得到所需的进给量或螺距，通过光杠或丝杠将运动传至刀架以进行切削。

丝杠与光杠用以连接进给箱与溜板箱，并把进给箱的运动和动力传给溜板箱，使溜板箱获得纵向直线运动。丝杠是专门用来车削各种螺纹而设置的，在进行工件的其他表面车

削时，只用光杠，不用丝杠。要结合溜板箱的内容区分光杠与丝杠的区别。

溜板箱是车床进给运动的操纵箱，内装有将光杠和丝杠的旋转运动变成刀架直线运动的机构，通过光杠传动实现刀架的纵向进给运动、横向进给运动和快速移动，通过丝杠带动刀架作纵向直线运动，以便车削螺纹。

刀架由两层滑板(中、小滑板)、床鞍与刀架体共同组成。用于安装车刀并带动车刀作纵向、横向或斜向运动。尾架安装在床身导轨上，并沿此导轨纵向移动，以调整其工作位置。尾架主要用来安装后顶尖，以支撑较长工件，也可安装钻头、铰刀等进行孔加工。

床身是车床带有精度要求很高的导轨(山形导轨和平导轨)的一个大型基础部件。用于支撑和连接车床的各个部件，并保证各部件在工作时有准确的相对位置。

冷却装置主要通过冷却水泵将水箱中的切削液加压后喷射到切削区域，降低切削温度，冲走切屑，润滑加工表面，以提高刀具使用寿命和工件的表面加工质量。图 13.10 所示为一台普通车床。

2. 铣床

铣床指主要用铣刀在工件上加工各种表面的机床(图 13.11)。通常铣刀旋转运动为主运动，工件(和)铣刀的移动为进给运动。它可以加工平面、沟槽，也可以加工各种曲面、齿轮等。铣床除能铣削平面、沟槽、轮齿、螺纹和花键轴外，还能加工比较复杂的型面，效率较刨床高，在机械制造和修理部门得到广泛应用。

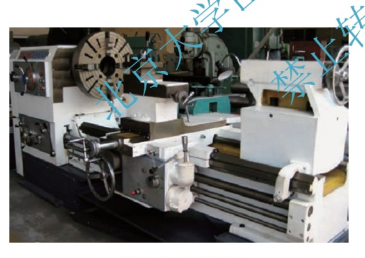


图 13.10　普通车床



图 13.11　X6132A 立式升降台铣床

3. 磨床

磨床是利用磨具对工件表面进行磨削加工的机床。大多数的磨床是使用高速旋转的砂轮进行磨削加工，少数的是使用油石、砂带等其他磨具和游离磨料进行加工，如珩磨机、超精加工机床、砂带磨床、研磨机和抛光机等。如图 13.12 所示常见的平面磨床加工示意图。

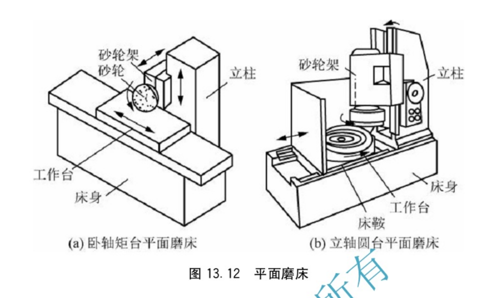


图 13.12 平面磨床

13.4 机床夹具

夹具是一种在机床上用以装夹工件(和引导刀具)的装置。其作用是将工件定位，以使工件获得相对于机床或刀具的正确位置，并把工件可靠的夹紧。装夹是将工件在机床上或夹具中定位、夹紧的过程。其中，定位是确定工件在机床或夹具中占有正确位置的过程，而夹紧则是指工件定位后将其固定，使其在加工过程中保持定位位置不变的操作。

在机械加工中应用夹具，具有四个方面的作用：

(1) 保证加工精度：用夹具装夹工件，能准确确定工件与刀具、机床之间的相对位置关系，可以保证加工精度。

(2) 提高生产效率：夹具能快速地将工件定位和夹紧，可以减少辅助时间，提高生产效率。

(3) 减轻劳动强度：夹具采用机械、气动、液动夹紧装置，可以减轻工人的劳动强度。

(4) 扩大机床的工艺范围：利用机床夹具，能扩大机床的加工范围。

1. 夹具的组成

机床夹具一般可以分为定位元件、夹紧装置、对刀元件、导向元件、夹具连接元件和夹具体这六个部分组成。

其中，定位元件是用于确定工件正确位置的元件。夹紧装置是使工件在外力作用下仍能保持其正确确定位置的装置。对刀元件、导向元件是用于确定(或引导)刀具相对夹具定位关系的元件。夹具连接元件是建立夹具和机床之间的联系。

2. 夹具的分类

根据其应用范围和特点，可以将夹具分为通用夹具、专用夹具、成组夹具和组合夹具等四大类。根据所使用的机床，可以将夹具分为车床夹具、铣床夹具、钻床夹具(钻模)、镗床夹具(镗模)、磨床夹具、齿轮机床夹具等。

根据产生夹紧力的动力源，可以将夹具分为手动夹具、气动夹具、液压夹具、电动夹具、电磁夹具、真空夹具等。

3. 工件在夹具中的定位

工件在夹具中的定位遵循六点定位原理，即：任何一个未受约束的物体，在空间都有6个自由度，因此，要确定物体在空间的位置，必须约束其6个自由度。理论上讲，工件的六个自由度可用六个支承点加以限制，前提是这六个支承点在空间按一定规律分布，并保持与工件的定位基面相接触，如图13.13所示。

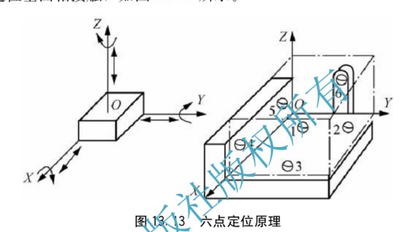


图13.13 六点定位原理

常用的定位元件：支承钉(相当一个支承点)、支承板、心轴、V形块、圆柱销、圆锥销。除支承钉外，一个定位元件限制两个或以上的自由度。

4. 工件在夹具中的夹紧

夹紧装置由动力装置和夹紧机构组成，其基本要求有：

(1) 夹紧时不能破坏工件在夹具中占有的正确位置；

(2) 夹紧力要适当，既要保证工件在加工过程中不移动、不转动、不振动，又不因夹紧力过大而使工件表面损伤、变形；

(3) 夹紧机构的操作应安全、方便、迅速、省力；

(4) 结构应尽量简单，制造、维修要方便。

5. 典型夹具

这里以钻床夹具为例，来说明一下夹具的结构和工作原理。

1) 定位元件

定位元件保证工件在夹具中处于正确的位置。如图3.14所示，钻后盖上的ϕ10mm孔，其钻夹具如图13.15所示。夹具上的圆柱销5、菱形销9和支承板4都是定位元件，通过它们使工件在夹具中占据正确的位置。

2) 夹紧装置

夹紧装置的作用是将工件压紧夹牢，保证工件在加工过程中受到外力(切削力等)作用时不离开已经占据的正确位置。螺杆8(与圆柱销合成一个零件)、螺母7和开口垫圈6就起到了上述作用。

3) 对刀或导向装置

对刀或导向装置用于确定刀具相对于定位元件的正确位置。钻套1和钻模板2组成导

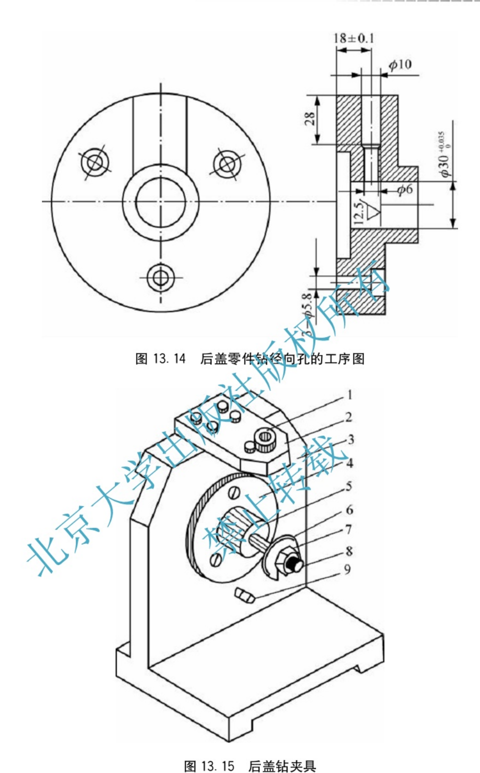


图 13.14 后盖零件钻径向孔的工序图

图 13.15 后盖钻夹具

1—钻套；2—钻模板；3—夹具体；4—支承板；5—圆柱销；
6—开口垫圈；7—螺母；8—螺杆；9—菱形销

向装置，确定了钻头轴线相对定位元件的正确位置。铣床夹具上的对刀块和塞尺为对刀装置。

4）连接元件

连接元件是确定夹具在机床上正确位置的元件。夹具体 3 的底面为安装基面，保证了钻套 1 的轴线垂直于钻床工作台以及圆柱销 5 的轴线平行于钻床工作台。因此，夹具体可

兼作连接元件。车床夹具上的过渡盘、铣床夹具上的定位键都是连接元件。

5）夹具体

夹具体是机床夹具的基础件，图 13.15 中为件 3，通过它将夹具的所有元件连接成一个整体。

6）其他装置或元件

它们是指夹具中因特殊需要而设置的装置或元件。若需加工按一定规律分布的多个表面时，常设置分度装置；为了能方便、准确地定位，常设置预定位装置；对于大型夹具，常设置吊装元件等。

13.5 切削加工过程

金属切削过程是刀具从工件表面上切除金属余量，形成合格已加工表面的过程。在这个过程中，会产生许多的物理现象，比如：切削力、切削热、刀具磨损等，由此引起的积屑瘤、鳞刺、振动等现象，不但会影响加工质量，而且也会对机床、刀具等产生影响。

1. 切屑

实验研究表明，金属切削与非金属切削不同，金属切削的特点是被切金属层在刀具的挤压、摩擦作用下产生变形以后转变为切屑和形成已加工表面。

切屑的类型很多，常见的四种切屑如图 13.16 所示。

（1）带状切屑：当切削塑性较大的金属材料如低碳钢、铜和铝合金或刀具前角较大，切削速度较高时，经常出现这类切屑。

（2）挤裂切屑（又称节状切屑）：工件材料塑性越差或用较大进给量低速切削钢材时，较容易得到这类切屑。

（3）粒状切屑（又称单元切屑）：工件塑性较差时，用较小的前角且降低切削速度，则能得到这种切屑。

（4）崩碎切屑：切削铸铁、黄铜等脆性材料时，切削层几乎不经过塑性变形阶段就产生崩裂，得到的切屑呈现不规则的粒状，工件加工后的表面也极为粗糙。

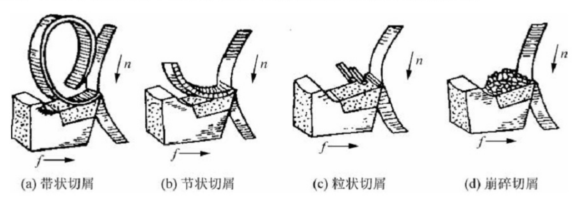


图 13.16 切屑的种类

2. 积屑瘤

在切削速度不高而又能形成连续性切屑的情况下，加工一般钢料或其他塑性材料时，

常常在刀具前刀面切削处黏着一块剖面呈三角状的硬块(图 13.17)，这块冷焊在前刀面上的金属就称为积屑瘤。积屑瘤的硬度很高，通常是工件材料的 2～3 倍，当它处于比较稳定的状态时，能够代替切削刃进行切削起到了保护刀具的作用，而且增大了实际前角，可减少切屑变形和切削力，但是会引起过量切削，降低了加工精度，当积屑瘤脱落时，其残片会黏附在已加工表面上恶化表面粗糙度，如果残片黏附在切屑底层会划伤刀具表面，因此在粗加工时可以利用积屑瘤的有利之处，精加工时应避免产生积屑瘤。

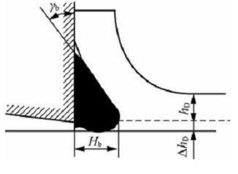


图 13.17 积屑瘤

影响积屑瘤产生的主要因素是工件材料和切削速度。工件材料塑性越好，越易生成积屑瘤；实践证明，切削速度很高或很低时，很少生成积屑瘤，在某一中低速范围内，积屑瘤容易生成。

3. 切削力与切削热

金属切削时，刀具切入工件使被切金属层发生变形成为切屑所需要的力称为切削力。金属切削时，力来源于两个方面，其一是克服在切屑形成过程中工件材料对弹性变形和塑性变形的变形抗力，其二是克服切屑与前刀面和后刀面的摩擦阻力。变形力和摩擦力形成了作用在刀具上的合力。

切削热是切削过程的重要物理现象之一，它不但影响刀具磨损和刀具寿命，影响积屑瘤的产生和加工表面质量，也影响工艺系统的热变形和加工精度。

4. 刀具磨损

进行金属切削加工时，刀具一方面将切屑切离工件，另一方面自身也要发生磨损或破损。磨损是连续的、逐渐的发展过程；而破损一般是随机的、突发的破坏(包括脆性破损和塑性破损)。如图 13.18 所示为刀具磨损的三种形式。

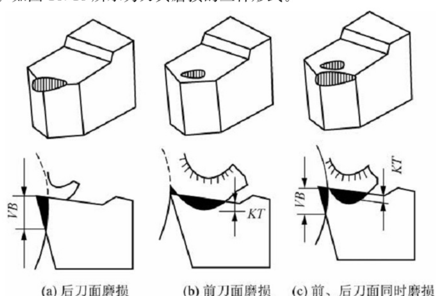


图 13.18 刀具磨损形式



5. 切削用量的选择

切削用量是用来表示切削加工中主运动和进给运动参数的数量。切削用量包括切削速度 V_c、进给量 f、背吃刀量 a_p 三个要素。

在切削加工时，切削刃选定点相对于工件主运动的瞬时速度称为切削速度，它表示在单位时间内工件和刀具沿主运动方向相对移动的距离，单位为 m/min 或 m/s。

进给量是刀具在进给运动方向上相对工件的位移量，可用刀具或工件每转或每行程的位移量来表述或度量。车削时进给量的单位是 mm/r，即工件每转一圈，刀具沿进给运动方向移动的距离。

背吃刀量 a_p 是指主刀刃工作长度(在基面上的投影)沿垂直于进给运动方向上的投影值。对于外圆车削，背吃刀量 a_p 等于工件已加工表面和待加工表面之间的垂直距离，单位为 mm。切削用量选择的一般顺序为：首先根据加工余量和加工阶段来确定背吃刀量，然后根据加工阶段选择进给量，最后，在背吃刀量和进给量选定以后，可在保证刀具合理寿命的条件下，确定合适的切削速度。

合理地选择切削用量，能够保证工件加工质量，提高切削效率，延长刀具使用寿命和降低加工成本。根据不同加工性质对切削加工的要求，切削用量会选得不一样。粗加工时，应尽量保证较高的金属切除率和必要的刀具寿命，一般优先选择大的背吃刀量，其次选择较大的进给量，最后根据刀具寿命，确定合适的切削速度。精加工时，应保证工件的加工质量，一般选用较小的进给量和背吃刀量，尽可能选用较高的切削速度。

13.6　切削加工质量

产品质量是指用户对产品的满意程度，传统质量观强调较多的往往是制造质量，它主要指产品的制造与设计的符合程度。而现代的质量观，主要站在用户的立场上衡量，包括三层含义：产品的设计质量、产品的制造质量、售后服务。对于金属切削制造而言，金属零件的切削加工质量包括加工精度和表面质量两个方面。

1. 加工精度

是指零件加工后的实际几何参数(尺寸、形状和位置)与理想几何参数的符合程度。实际几何参数与理想几何参数的偏离程度，称为加工误差。加工误差越小，加工精度越高。加工精度包括：

(1) 尺寸精度：是加工后零件的实际尺寸与理想尺寸的符合程度。理想尺寸是指所标注尺寸的公差带中心值。

(2) 形状精度：是加工后零件表面实际测得的形状和理想形状的符合程度。理想形状是指几何意义上的绝对正确的平面、圆柱面等表面。

(3) 位置精度：是加工后零件各表面相互之间的实际位置和理想位置的符合程度。理想位置是指几何意义上的绝对地平行、垂直、同轴和绝对准确的角度关系等。

零件表面的尺寸、形状和位置精度是有联系的，一般形状精度应比位置精度高，位置精度的公差应小于其尺寸公差值。

影响加工精度的主要因素比较复杂，包括：机床误差、工艺系统(机床、刀具、夹具

和工件)弹性变形所引起的误差、夹具、刀具及量具的制造误差、装夹误差、温度所引起的误差等多个方面。

在实际生产过程中，对于加工精度不符合设计要求的工件，要分析影响误差的原因，进而采用调整或改进措施。这就需要进行加工误差的统计分析。常用的统计分析方法有两种，一是分布曲线法，二是点图分析法。

分布曲线法是通过测量一批零件加工后的实际尺寸，做出尺寸分布曲线，然后按照此曲线来判断该加工方法所产生的加工误差，但这种方法没有考虑工件加工的先后顺序，不能反映误差变化的趋势，为此生产上采用点图分析法来弥补不足。点图分析法是在一批零件的加工过程中，依次测量每个零件的加工尺寸，并记入以顺次加工的零件号为横坐标、零件加工尺寸为纵坐标的图表中，便构成了单值点图。

2. *表面质量*

机械零件的破坏，一般总是从表面层开始的。产品的性能，尤其是它的可靠性和耐久性，在很大程度上取决于零件表面层的质量。

切削加工获得的表面，其质量主要表现在表面粗糙度、纹理结构和表面的力学性能两个方面。

影响表面粗糙度的因素有残留面积、积屑瘤、刀具磨损等因素。影响表面力学性能的主要因素则有：加工硬化、残余应力等。表面粗糙度将影响零件的耐磨性、耐腐蚀性、抗疲劳性以及零件的配合性能。

13.7 典型零件的机械加工工艺

机械加工工艺过程是指用机械加工方法改变毛坯形状、尺寸、相对位置和性质，使其成为零件的全部过程。机械加工工艺过程包含若干道工序，或者说，工序是机械加工工艺过程的基本单元。如果把机械加工工艺过程比作宴会菜单的话，工序就是菜单中的每一道菜。

下面以阶梯轴的加工为例，来说明零件的机械加工工艺。轴类零件是常见的典型零件之一。按轴类零件结构形式不同，一般可分为光轴、阶梯轴和异形轴三类；或分为实心轴、空心轴等。它们在机器中用来支承齿轮、带轮等传动零件，以传递转矩或运动。

台阶轴的加工工艺较为典型，反映了轴类零件加工的大部分内容与基本规律。下面就以减速箱中的传动轴为例，介绍一般台阶轴的加工工艺。首先分析零件图(图 13.19)，可以看出该传动轴的关键工序是轴颈 M、N 和外圆 P、Q 的加工。

(1) 确定毛坯：该传动轴材料为 45 号钢，因其属于一般传动轴，故选 45 号钢可满足其要求。该传动轴属于中、小传动轴，并且各外圆直径尺寸相差不大，故选择 ϕ60mm 的热轧圆钢作毛坯。

(2) 确定主要表面的加工方法：传动轴大都是回转表面，主要采用车削与外圆磨削成形。由于该传动轴的主要表面 M、N、P、Q 的公差等级(IT6)较高，表面粗糙度 Ra 值($Ra=0.8\mu m$)较小，故车削后还需磨削。外圆表面的加工方案可为：粗车→半精车→

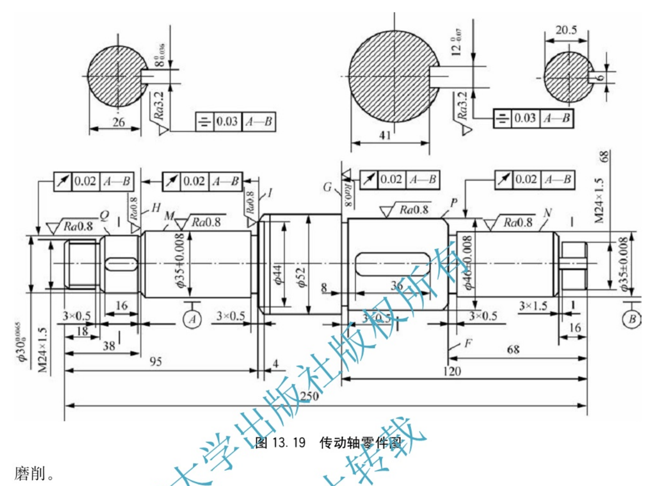


图 13.19　传动轴零件图

磨削。

(3) 确定定位和装夹：以毛坯外圆作粗基准，先加工一个端面，钻中心孔，车出一端外圆；然后以已车过的外圆作基准，用三爪自定心卡盘装夹(有时在上工步已车外圆处搭中心架)，车另一端面，钻中心孔。如此加工中心孔，才能保证两中心孔同轴。

(4) 划分阶段：对精度要求较高的零件，其粗、精加工应分开，以保证零件的质量。该传动轴加工划分为三个阶段：粗车(粗车外圆、钻中心孔等)，半精车(半精车各处外圆、台阶和修研中心孔及次要表面等)，粗、精磨(粗、精磨各处外圆)。各阶段划分大致以热处理为界。

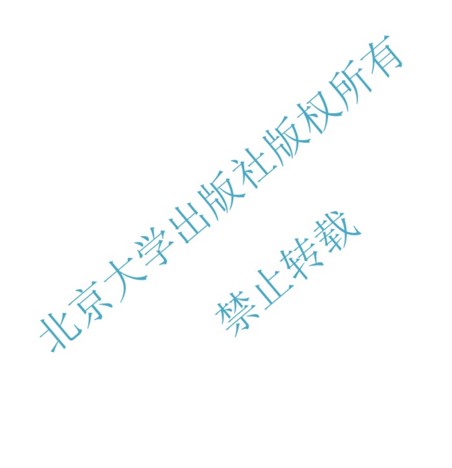
(5) 热处理工序安排：轴的热处理要根据其材料和使用要求确定。对于传动轴，正火、调质和表面淬火用得较多。该轴要求调质处理，并安排在粗车各外圆之后，半精车各外圆之前。

(6) 传动轴的工艺路线：下料→车两端面，钻中心孔→粗车各外圆→调质→修研中心孔→半精车各外圆，车槽，倒角→车螺纹→划键槽加工线→铣键槽→修研中心孔→磨削→检验。

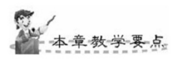
思考及实践

1. 到学校实习工厂参观或在师傅指导下实习，了解各种机床和刀具，观察切削加工过程。

2. 金属切削加工的方法有哪些？要用到哪些机床和刀具？
3. 机床夹具在机械加工中有什么作用？
4. 分析一下金属切削过程中，刀具磨损的原因和过程。
5. 如何评价切削加工零件的质量？
6. 请查找资料，了解一下汽车轴承的切削加工工艺过程。



第14章 数控技术



知识要点	掌握程度	相关知识
数控技术产生背景和概念	了解数控技术产生的背景； 熟悉数控技术的概念	数控技术产生的背景； 数控技术的概念
机械产品的数控化	了解机械产品的发展历程； 熟悉数控机械产品的特点和种类	机械产品的发展历程； 数控机械产品的特点和种类
数控加工的基本过程	熟悉数控加工的基本过程； 了解数控加工和传统加工的区别	数控加工的基本过程； 数控加工和传统加工的区别
数控机床的主要类型	掌握按加工方式和工艺用途分类的数控机床类型； 了解按加工路线分类的数控机床类型； 了解按可控制联动的坐标轴分类的数控机床类型	按加工方式和工艺用途分类的数控机床类型； 按加工路线分类的数控机床类型； 按可控制联动的坐标轴分类的数控机床类型
数控机床的组成	了解数控机床的五大组成部分	数控机床的五大组成部分
数控加工程序编制	掌握数控编程的一般步骤； 了解手工编程和自动编程的方法	数控编程的一般步骤； 手工编程和自动编程的方法

14.1 概　　述

随着科学技术和社会生产力的快速发展，人们对于机械产品的质量和生产效率提出了越来越高的要求。数控技术及数控机床正是诞生在这样的需求背景下，使得多品种、小批量产品零件的自动化生产称为可能。1952年，美国Parsons公司和MIT合作，研制成功了世界上第一台用专用电子计算机控制的三坐标立式数控铣床，但是并没有立即被人们所重视和广泛应用，只是在航空工业中应用。而今，数控技术应用非常广泛，中国正在开展“数控一代”企业装备升级和数字化制造的技术变革，从东莞大朗的织袜机的数控升级，到东北老工业基地的振兴发展，无不和数控技术密切相关，可以说，数控技术的推广应用是当今中国社会转型发展的缩影。

福特汽车最早开始采用自动流水生产线，标志着自动化生产时代的到来。飞机、农机、家电等企业也都纷纷采用自动机床、组合机床和自动生产线，从而保证了产品质量，极大地提高了生产效率，在大批量生产的情况下降低了单件生产成本，也极大地改善了工人的劳动条件。然而，20世纪70年代之后，市场经济体制日趋成熟，绝大多数的产品都已从卖方市场转向买方市场，产品的竞争十分激烈，迫使生产企业不断更新产品，提高产品的性价比，以满足用户的需要。由于以大批量生产为主的生产方式难以进行产品的改型和更新，这种以“刚性”的自动化生产方式日益暴露出其不适应，这就促进了数控技术发展和推广应用。

所谓数字控制是指以数字化信号对机构的运动过程进行控制的一种方法，简称为数控（Numerical Control，NC）。数控机床则指应用数控技术对加工过程进行控制的机床。而数控加工泛指在数控机床上进行零件加工的工艺过程。

14.2 机械产品的数控化

1. 机械的发展历程

传统机械设备是由动力装置、传动装置和工作装置等三个部分构成的，如图14.1所示。

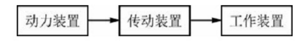


图14.1 传统机械设备的构成

机械发展和创新的途径多种多样，但主要有两种方法：一是创新工作原理或工作装置；二是创新运动的驱动和控制系统。工作原理的创新是根本性的，极为重要，3D打印技术即属于这类创新。千百年来，人们一直在不断创造出各种新的机械，形成了适用于完成各种不同任务的成千上万的机械产品。

数控化则是对于机械运动的驱动和控制的创新，数控机械产品的构成如图14.2所示。数控化是创新机械产品的有效途径，其核心技术是：用伺服电机驱动系统取代传统机械中

的动力装置与传动装置，更重要的是用计算机控制系统对机械运动与工作过程进行控制。

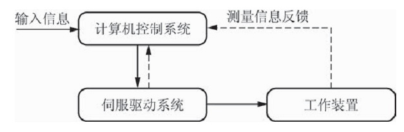


图 14.2　数控机械设备的构成

综观全球实现产业结构调整和机械产品升级的历程(图 14.3)：蒸汽机技术使机械工业由人力制作时代进入机械化时代；电气技术使机械工业由机械化时代进入电气化时代；数控技术正在使机械工业由电气化时代跃升为数字化时代；智能化技术将使机械工业由数字化时代进入智能化时代。

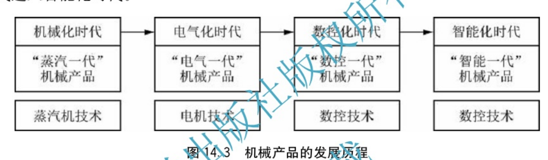


图 14.3　机械产品的发展历程

“蒸汽一代”机械产品的核心推动力是由于蒸汽机技术这一使能技术带来的一场动力革命。“电气一代”机械产品的核心推动力则是由于电机技术这一使能技术带来的另一场动力革命。而数控技术这一使能技术对机械产品带来的革命则更加深刻，因为数控化机械增加了一个“大脑”，可使机械产品的功能与性能产生质的飞跃，并为人工智能等先进信息技术的进一步应用奠定了基础，从而最终实现智能化。

2. 数控机械产品

数控机械产品与传统机械产品工作装置基本相同，不同点之一在于动力传动系统。在数控机械产品中，传统机械中作为动力源的普通电动机被具有动力与变速功能的伺服电动机取代，使传统的机械传动机构得以取消或极大简化，并使机械产品的运动和跟踪过程控制能力极大提高。

不同点之二是数控机械产品拥有一个具有强大信息处理与控制功能的计算机控制系统，也可以说是增加了一个“大脑”。这使数控机械具有多功能、高柔性、高精度、高效能、高可靠和操作方便等特征，并使智能化成为可能。

机械产品种类很多，大都可以通过数控化实现创新，提升到“数控一代”的水平，从根本上提高产品的功能、性能和竞争力。除了用于金属零件加工的数控机床外，还有数控编织机、数控注塑机、数控木工机床、数控冲床等。

1）数控编织机

我国是毛衣纺编织大国，仅东莞大朗镇每年生产毛衣超过 3 亿件。目前，国内毛衣生产主要依靠简单的机械完成，全国有 100 余万台手动编织机(横机)。手动横机效率低下，工人的劳动强度很大。

而采用数控编织机(图 14.4)，编织速度比手工横机提高 5～8 倍，每个工人可操作 5 台以上设备，大大提高生产效率。截至 2012 年底，大朗镇共有数控编织机 4 万台，节省劳动力 20 万人，解决了近年来招工难、劳动力成本高的问题。而且采用数控编织机，大大提高了毛衣花色品种、质量与市场竞争力。



图 14.4 数控编织机及产品

2) 数控注塑机

我国是全球最大的注塑机生产国，产量占世界年产量的 70%以上。与传统的液压式注塑机相比，数控注塑机(图 14.5)的工作装置基本不变，其主要变化在于：(1) 采用伺服电机驱动配合滚珠丝杆和同步齿形带传动取代了液压注塑机的液压泵、液压缸、液压马达等构成的液压驱动系统；(2) 采用计算机数控系统取代了液压注塑机的模拟量电液控制系统。与液压注塑机相比，数控注塑机具有如下优点：

(1) 提高了精度及稳定性：可实现复杂的控制功能，柔性好，具有优良的控制精度和稳定性，生产的产品质量好且稳定。

(2) 提高了生产效率：由于伺服电机有优良的高速性，且其控制系统容易实现复杂的同步重叠动作，可大大提高生产效率；同时，数控系统可“智能”设置、调整和优化工艺参数，使生产效率与质量进一步提高。

(3) 节能与环保：消耗电力可以减少 40%左右，噪声低、无油污染。



图 14.5 全电动数控注塑机及产品

3) 数控木工机床

家具业已成为国民经济的重要产业，据有关资料显示，2012 年我国家具生产总值已

超过1万亿人民币，出口超过400亿美元。

使用数控木工机床可以减少家具生产过程中的许多辅助模具和夹具，能实现生产线的自动化，工人的劳动由复杂变简单，大幅度降低了劳动成本，因而，应用数控技术可为家具生产企业获得超额利润。

中国木工机械行业的数控化也是家具产业升级的希望所在，随着国内数控设备成本的下降，木工机械数控化已具备普及的前提，当前我国的木工机床行业从数控技术的普及入手，逐步向成套化、智能化和大型化方向发展。

如图14.6所示为国产数控木工车床以及采用数控木工机床加工的扶梯立柱，不仅可以加工形状复杂的立柱，而且改变程序就可以改变花样，适应了当今人们生活高品质、个性化、多样化的需求。

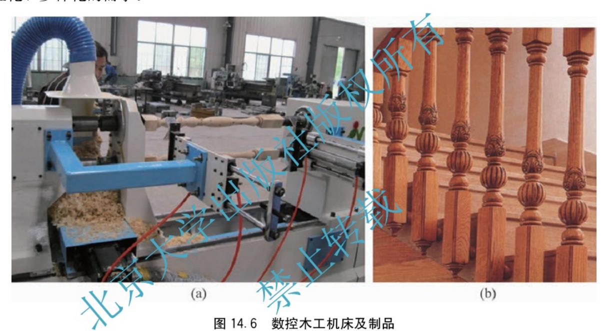


图14.6　数控木工机床及制品

14.3　数控加工基本过程

数控加工的工作原理是将零件图形和工艺参数、加工步骤等以数字信息的形式，编成程序代码输入到机床控制系统中，再由其进行运算处理后转成驱动伺服机构的指令信号，从而控制机床各部件协调动作，自动完成零件的加工。

从图14.7可以看出数控机床加工工件的基本过程即从零件图到加工好零件的整个过程。

数控机床在普通机床基础上增加了对机床运动和动作自动控制的功能部件，使数控机床能够自动完成对零件加工的全过程。从图14.8可以看出数控加工和传统加工的主要区别在于，数控加工是用数控加工程序来自动控制加工过程，而不是靠工人按照工序卡来进行加工。

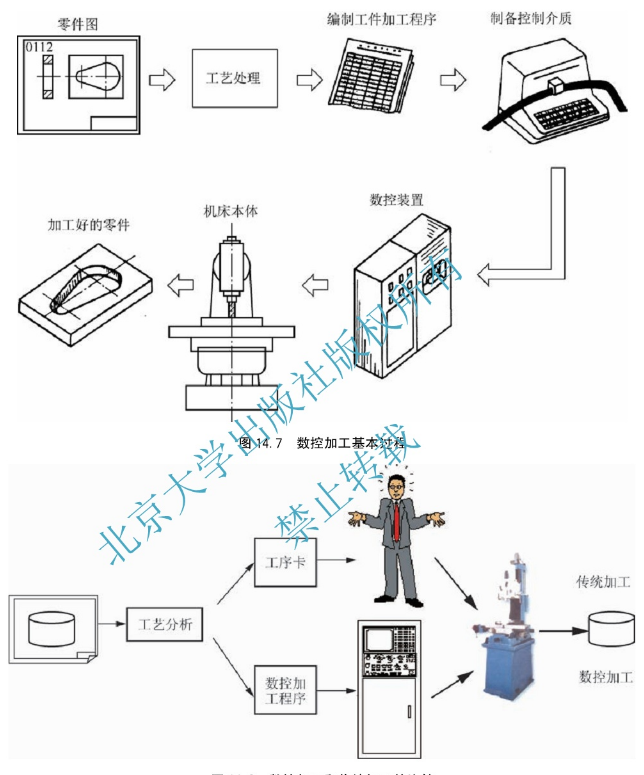


图 14.7 数控加工基本过程

图 14.8 数控加工和传统加工的比较

14.4 数控机床的主要类型

随着数控技术的发展，数控机床出现了许多分类方法，但通常按以下最基本的几个方面进行分类：

1. 按加工方式和工艺用途分类

这种分类方法和普通机床的分类方法相似，按切削方式不同，可分为数控车床、数控铣床、数控钻床、数控镗床、数控磨床等。有些数控机床具有两种以上切削功能，例如：以车削为主兼顾铣、钻削的车削中心；具有铣、镗、钻削功能，带刀库和自动换刀装置的镗铣加工中心(简称加工中心)，如图 14.9 所示。



图 14.9　数控车床、数控铣床和加工中心

另外，还有数控电火花线切割、数控电火花成形、数控激光加工、等离子弧切割、火焰切割、数控板材成形、数控冲床、数控剪床、数控液压机等各种功能和不同种类的数控加工机床。

2. 按加工路线分类

数控机床按其刀具与工件相对运动的方式，可以分为点位控制、直线控制和轮廓控制，如图 14.10 所示。

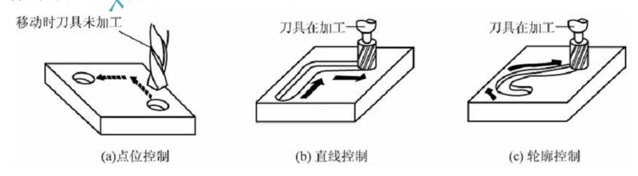


图 14.10　数控机床分类

（1）点位控制：点位控制方式就是刀具与工件相对运动时，只控制从一点运动到另一点的准确性，而不考虑两点之间的运动路径和方向，如图 14.10(a)所示。这种控制方式多应用于数控钻床、数控冲床、数控坐标镗床和数控点焊机等。

（2）直线控制：直线控制方式就是刀具与工件相对运动时，除控制从起点到终点的准确定位外，还要保证平行坐标轴的直线切削运动。由于只作平行坐标轴的直线进给运动，因此不能加工复杂的工件轮廓，如图 14.10(b)所示。这种控制方式用于简易数控车床、数控铣床、数控磨床。

（3）轮廓控制：轮廓控制就是刀具与工作相对运动时，能对两个或两个以上坐标轴的

运动同时进行控制。因此可以加工平面曲线轮廓或空间曲面轮廓，如图 14.10(c)所示。采用这类控制方式的数控机床有数控车床、数控铣床、数控磨床、加工中心等。

3. 按可控制联动的坐标轴分类

所谓数控机床可控制联动的坐标轴，是指数控装置控制几个伺服电动机，同时驱动机床移动部件运动的坐标轴数目。

(1) 两坐标联动：数控机床能同时控制两个坐标轴联动(图 14.11)，即数控装置同时控制 X 和 Z 方向运动，可用于加工各种曲线轮廓的回转体类零件。或机床本身有 X、Y、Z 三个方向的运动，数控装置中只能同时控制两个坐标(图 14.12)，实现两个坐标轴联动，但在加工中能实现坐标平面的变换，用于加工图 14.13(a)所示的零件沟槽。

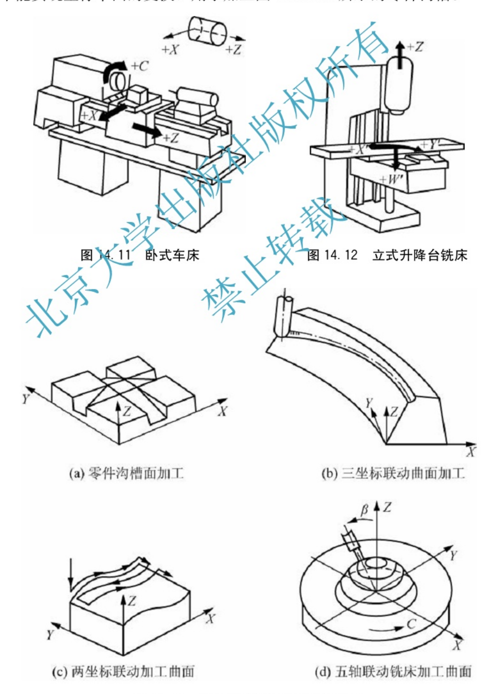


图 14.11 卧式车床　图 14.12 立式升降台铣床

(a) 零件沟槽面加工　(b) 三坐标联动曲面加工

(c) 两坐标联动加工曲面　(d) 五轴联动铣床加工曲面

图 14.13 空间平面和曲面的数控加工

(2) 三坐标联动：数控机床能同时控制三个坐标轴联动，此时，铣床称为三坐标数控铣床，可用于加工曲面零件，如图 14.13(b)所示。

(3) 两轴半坐标联动：数控机床本身有三个坐标能作三个方向的运动，但控制装置只能同时控制两个坐标，而第三个坐标只能作等距周期移动，可加工空间曲面，如图 14.13(c)所示零件。数控装置在 ZX 坐标平面内控制 X、Z 两坐标联动，加工垂直面内的轮廓表面，控制 Y 坐标作定期等距移动，即可加工出零件的空间曲面。

(4) 多坐标联动：数控机床能同时控制四个以上坐标轴联动，多坐标数控机床的结构复杂、精度要求高、程序编制复杂，主要应用于加工形状复杂的零件。五轴联动铣床加工曲面形状零件，如图 14.13(d)所示。

14.5 数控机床的组成

数控机床是典型的数控化设备，它一般由程序编制及程序载体输入装置、计算机数控装置及强电控制装置、伺服驱动系统及位置检测装置、机床的机械部件五大部分组成。

1) 程序编制及程序载体输入装置

程序的编制是根据零件的所有运动、尺寸、工艺参数等加工信息，用标准的由文字、数字和符号组成的数控代码，按规定的方法和格式，编制零件加工的数控程序单。编制程序的工作可由人工进行，或者在数控机床以外用自动编程计算机系统来完成，现代数控机床都可以在它的数控装置上直接编程。

编好的数控程序存放在便于输入到数控装置的一种存储载体上，程序载体(信息载体)又称控制介质，用于记录数控机床上加工一个零件所必需的各种信息，以控制机床的运动，实现零件的机械加工。

输入装置的作用是将程序载体上的数控代码变成相应的电脉冲信号，传送并存入数控装置内。根据程序存储介质的不同，老式的输入装置可以是光电阅读机、录放机或软盘驱动器。现代数控机床不用任何控制介质，而是采用键盘直接输入的方式将加工程序输送给数控装置(简称 MDI)，有的还可以将数控加工程序由编程计算机用通信方式(如 RS232)传送给数控装置。

数控机床也可采用操作面板上的按钮和键盘将加工信息直接输入，或通过串行口与网络接口将计算机上编写的加工程序输入到数控系统。高级的数控系统可能还包含一套自动编程机或者 CAD/CAM 系统，如图 14.14 所示。

2) 计算机数控装置及强电控制装置

计算机数控装置是数控机床的核心，它接受输入装置送来的脉冲信号，经过数控装置的系统软件或逻辑电路进行编译、运算和逻辑处理后，输出各种信号和指令控制机床的各个部分，进行规定的、有序的动作。

强电控制装置是介于数控装置和机床机械、液压部件之间的控制系统。其主要作用是接收数控装置输出的主运动变速、刀具选择交换、辅助装置动作等指令信号，经必要的编译、逻辑判断、功率放大后直接驱动相应的电器、液压、气动和机械部件，以完成指令所规定的动作，此外，还有行程开关和监控检测等开关信号也要经过强电控制装置送到数控



图 14.14 FANUC 数控系统(显示器及操作面板)

装置进行处理。

3）伺服驱动系统

伺服驱动系统由伺服驱动电路和伺服驱动装置(电机)组成，并与机床上的执行部件和机械传动部件组成数控机床的进给系统。每个作进给运动的执行部件都配有一套伺服驱动系统。伺服驱动系统有开环、半闭环和闭环之分。

4）位置检测装置

位置检测装置作用是间接或直接测量执行部件的实际进给位移，与指令位移进行比较后，按闭环原理，将其误差转换放大后控制执行部件的进给运动。因此只存在在半闭环和闭环伺服驱动系统中。

5）机械部件

机械部件指的是数控机床机械结构实体。它与传统的普通机床相比较，同样由主传动机构、进给传动机构、工作台、床身以及立柱等部分组成，但数控机床的整体布局、外观造型、传动机构、刀具系统及操作机构等方面都发生了很大的变化。这种变化的目的是为了满足数控技术的要求和充分发挥数控机床的特点。归纳起来有以下几点：

(1) 采用高性能主传动及主轴部件；

(2) 进给传动采用高效传动件；

(3) 有较完善的刀具自动交换和管理系统；

(4) 具有工件自动交换、工件夹紧与放松机构；

(5) 床身机架具有很高的动、静刚度；

(6) 采用全封闭罩壳。

14.6 数控加工程序编制

数控加工程序编制是从零件图纸到制成控制介质的全过程。具体而言，是将零件的加工信息、加工顺序、零件轮廓轨迹尺寸、工艺参数(F、S、T)及辅助动作等(变速、换刀、

冷却液启停、工件夹紧松开等)，用规定的文字、数字、符号组成的代码按一定的格式编写加工程序单，并将程序单的信息变成控制介质的整个过程。

程序编制分为手工编程和自动编程两种。手动编程的整个编程过程由人工完成。对编程人员的要求高(不仅要熟悉数控代码和编程规则，而且还必须具备机械加工工艺知识和数值计算能力)对于自动编程而言，编程人员只要根据零件图纸的要求，按照某个自动编程系统的规定，将零件的加工信息用较简便的方式送入计算机，由计算机自动进行程序的编制，编程系统能自动打印出程序单和制备控制介质。

手工编程适用于几何形状不太复杂的零件。自动编程适用于形状复杂的零件，或者虽不复杂但编程工作量很大的零件(如有数千个孔的零件)，或者虽不复杂但计算工作量大的零件(如轮廓加工时，非圆曲线的计算)。编程自动化是当今数控技术发展的趋势，随着各种先进的 CAD/CAM 软件的发展，自动编程已经成为数控编程的主流。

一般来说，不管是手动编程还是自动编程，数控机床程序编制的步骤可分为：图纸工艺分析、计算运动轨迹、程序编制、制备控制介质、校验和试切五大部分，如图 14.15 所示。

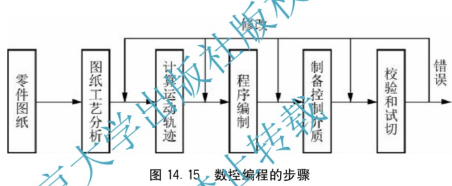


图 14.15 数控编程的步骤

图纸工艺分析与普通机床加工零件时的工艺分析相同，即在对图纸进行工艺分析的基础上，选定机床、刀具与夹具；确定零件加工的工艺线路、工步顺序及切削用量等工艺参数等。

计算运动轨迹是根据零件图纸上尺寸及工艺线路的要求，在选定的坐标系内计算零件轮廓和刀具运动轨迹的坐标值，并且按数控机床的规定编程单位(脉冲当量)换算为相应的数字量，以这些坐标值作为编程尺寸。

编制程序及初步校验是根据制定的加工路线、切削用量、刀具号码、刀具补偿、辅助动作及刀具运动轨迹，按照数控系统规定指令代码及程序格式，编写零件加工程序，并进行校核、检查上述两个步骤的错误。

所制备的控制介质，必须经过进一步的校验和试切削，证明是正确无误，才能用于正式加工。如有错误，应分析错误产生的原因，进行相应的修改，这就是程序的校验和试切。常用的校验和试切方法有：对于平面轮廓零件可在机床上用笔代替刀具、坐标纸代替工件进行空运转空运行绘图；在具有图形显示功能的机床上，用静态显示(机床不动)或动态显示(模拟工件的加工过程)的方法，则更为方便；对于空间曲面零件，可用蜡块、塑料或木料或价格低的材料作工件，进行试切，以此检查程序的正确性。

1. 手工 G 指令编程举例

如图 14.16 所示为被车削工件和 CK0630 数控车床的刀具布置图，该数控车床安装的

为 FUNAC 0 系统，毛坯为 ϕ45mm×120mm 棒材，材料为 45 号钢，数控车削端面、外圆。数控编程步骤如下：

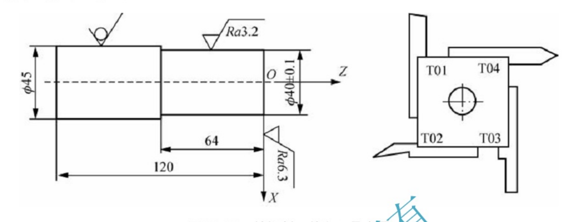


图 14.16 被切削工件和刀具布置

1）根据零件图样要求、毛坯情况，确定工艺方案及加工路线

（1）对短轴类零件，轴心线为工艺基准，用三爪自定心卡盘夹持 ϕ45 外圆，使工件伸出卡盘 80mm，一次装夹完成粗精加工。

（2）工步顺序

① 粗车端面及 ϕ40mm 外圆，留 1mm 精车余量。

② 精车 ϕ40mm 外圆到尺寸。

2）选择机床设备

根据零件图样要求，选用经济型数控车床即可达到要求。故选用 CK0630 型数控卧式车床。

3）选择刀具

根据加工要求，选用两把刀具，T01 为 90°粗车刀，T03 为 90°精车刀。同时把两把刀在自动换刀刀架上安装好，且都对好刀，把它们的刀偏值输入相应的刀具参数中。

4）确定切削用量

切削用量的具体数值应根据该机床性能、相关的手册并结合实际经验确定，详见加工程序。

5）确定工件坐标系、对刀点和换刀点

确定以工件右端面与轴心线的交点 O 为工件原点，建立 XOZ 工件坐标系，如图 14.16 所示。

采用手动试切对刀方法把点 O 作为对刀点。换刀点设置在工件坐标系下 X55、Z20 处。

6）编写程序

按该机床规定的指令代码和程序段格式，把加工零件的全部工艺过程编写成程序清单。该工件的加工程序如下：

```
N0010  G59  X0  Z100          ;设置工件原点
N0020  G90
N0030  G92  X55  Z20          ;设置换刀点
N0040  M03  S600
N0050  M06  T01               ;取 1 号 90°偏刀,粗车
N0060  G00  X46  Z0
N0070  G01  X0  Z0
N0080  G00  X0  Z1
N0090  G00  X41  Z1
N0100  G01  X41  Z-64  F80   ;粗车 φ40mm 外圆,留 1mm 精车余量
N0110  G28
N0120  G29                    ;回换刀点
N0130  M06  T03               ;取 3 号 90°偏刀,精车
N0140  G00  X40  Z1
N0150  M03  S1000
N0160  G01  X40  Z-64  F40   ;精车 φ40mm 外圆到尺寸
N0170  G00  X55  Z20
N0180  M05
N0190  M02
```

注明：以上只是以一个简单的例子来阐明数控编程的过程，对数控编程感兴趣的同学，可以参考 FUNAC 数控编程资料进行深入学习。

2. 自动编程举例

这里简单介绍一下用在我国应用比较广泛的 MasterCAM 软件进行自动编程，MasterCAM 能够接受来自包括 UG、Pro/E、CATIA、SIMATRON、SolidWorks、AutoCAD 等常见的各种 CAD/CAM 系统在内的 2D/3D 文件格式，能完成从 2D 设计到 3D 设计及 CAM 编程的技术过程，适合于各种数控系统的机床，是将 CAD 和 CAM 集成在一起的一套比较完整的软件。MasterCAM 共包含 5 个模块：设计模块，用于被加工零件的造型设计；铣削模块，主要用于生成铣削加工刀具路径；车削模块，主要用于生成车削加工刀具路径；线切割模块，主要用于生成线切割加工刀具路径；雕刻模块，主要用于雕刻加工。

使用 MasterCAM 编程时，只要在 CAD 部分绘制零件的二维或三维图形后，便可在 CAM 中选择适当的加工模块(铣削加工、车削加工、线切割或雕刻加工)，根据工艺要求设计相应的刀具参数和特性参数，生成刀具路径 NCI 文件，再通过后置处理程序生成 NC 文件，即数控机床能够识别的 G 代码，然后进行适当的编辑和修改，传输给数控机床，装上相应的刀具，便可加工各种不同类型的零件。

本实例介绍运用 MasterCAM 软件的二维铣削自动编程过程。在 Mastercam 软件中，为了编制零件的应用 NC 加工程序，需要先建立该零件的模型。分析上述零件，只要建立如图所示的俯视图的二维外形模型，根据二维外形模型，结合 Z 轴的深度(从主视图中获得)，产生零件的二维加工刀具路径轨迹，经过后处理，产生 NC 加工程序，就可以在数控铣床或加工中心上加工出该零件。加工过程中，XY 方向两轴做进给运动，Z 轴不做进给运动。零件尺寸如图 14.17 所示。

1) 绘制零件造型

其工作界面如图 14.18 所示。

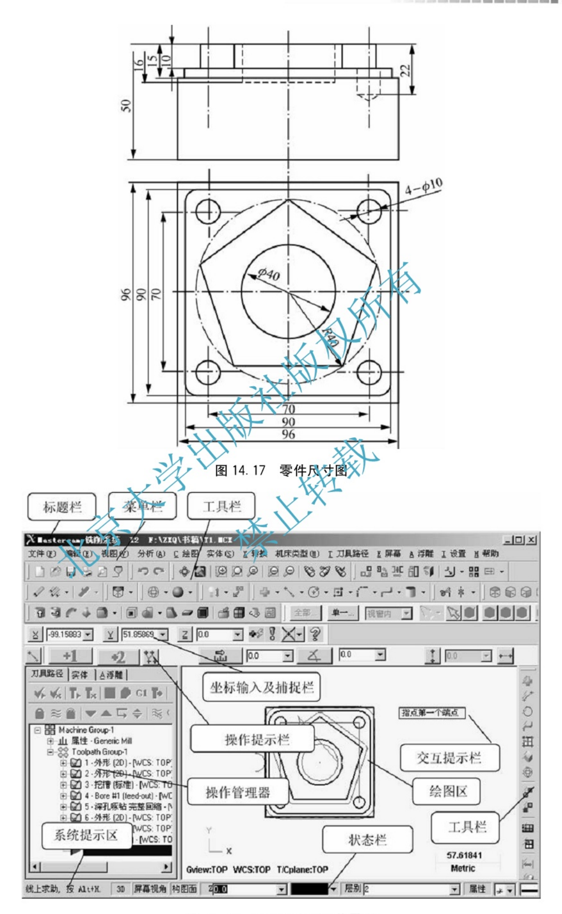


图 14.17　零件尺寸图

图 14.18　MasterCAM 工作界面

2）选择机床类型

根据此零件特点选择普通数控铣床，单击菜单栏 机床类型(M) → 铣削系统(M) → 默认(D)，即可选定。

3）加工工艺分析

不管是手工编程还是计算机辅助编程，加工工艺都是必须关注的。MasterCAM 软件的 CAM 功能主要是自动产生刀具路径，加工工艺还需要编程人员事先制订。该零件毛坯是经过预先铣削加工过的规则合金铝材，尺寸为 96mm×96mm。

（1）装夹方法。此零件毛坯规则，采用平口钳装夹。

（2）设定毛坯尺寸。

（3）加工路线分析。

根据图样，确定加工顺序：台阶四边形外形铣削粗加工→五边形外形铣削粗加工→ϕ40 孔挖槽粗加工→钻 ϕ10 小孔→四边形外形精加工→五边形外形精加工→ϕ40 孔挖槽精加工。

（4）刀具选用。根据工件的尺寸及形状，选用刀具如下：直径 ϕ10mm 的中心钻(用于打定位孔)，直径 ϕ10mm 的钻头(用于钻四个小孔)，直径 ϕ12mm 的双刃平铣刀(用于粗加工)，直径 ϕ8mm 的四刃平铣刀(用于精加工)。

4）加工刀具路径的选定

（1）台阶四边形外形铣削粗加工。

（2）五边形外形铣削粗加工。

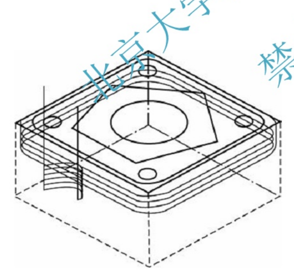


图 14.19　台阶四边形外形铣削粗加工刀具路径

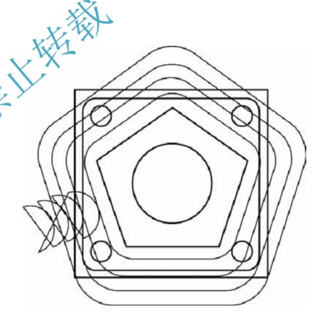


图 14.20　五边形外形粗加工刀具路径

（3）ϕ40 孔挖槽粗加工。

（4）钻 ϕ10 小孔。

（5）四边形外形精加工。

以上五步只需要在软件上按照一定的步骤进行操作设置，即可以完成刀具路径的选定。

5）实体切削验证

实体切削验证可更加直观地模拟实体加工的过程。最终结果如图 14.21 所示，验证结

果表示所要加工的二维铣削零件符合加工要求。

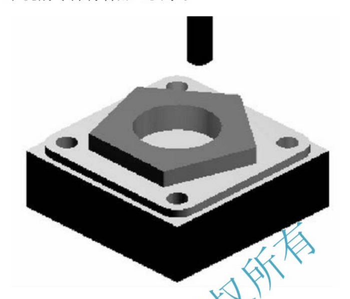


图 14.21 实体切削验证结果

6）参数修改

通过实体切削验证检查某个刀具路径有问题时，可以进行参数修改。

7）后置处理，产生 NC 加工程序，如图 14.22 所示。

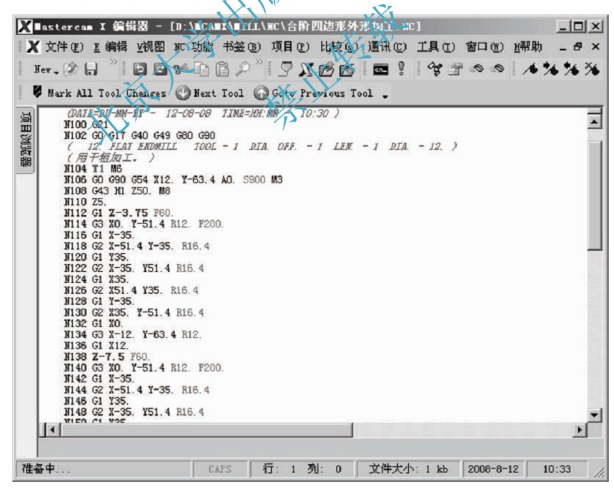
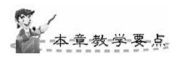


图 14.22 自动生成的 NC 代码

思考及实践

1. 到学校实习工厂，看看采用数控机床是如何进行金属零件加工的。
2. 数控技术是如何发展起来的?
3. 除了数控机床外，数控技术还在哪些机械产品中有重要应用?
4. 数控加工工艺的一般过程是怎么样的?
5. 数控机床是由哪些部分构成的? 各起什么作用?
6. 数控编程一般由哪些步骤构成?

第15章 特种加工



知识要点	掌握程度	相关知识
特种加工概述	掌握特种加工的概念； 了解特种加工的分类	特种加工的概念； 特种加工的分类
激光束加工	了解激光加工的原理； 熟悉激光加工的应用	激光加工的原理； 激光加工的应用
电子束加工	了解电子束加工的原理； 熟悉电子束加工的应用	电子束加工的原理； 电子束加工的应用
离子束加工	了解离子束加工的原理； 熟悉离子束加工的应用	离子束加工的原理； 离子束加工的应用
电火花加工	了解电火花加工的原理和种类； 掌握电火花线切割加工工艺及应用	电火花加工的原理和种类； 电火花线切割加工工艺及应用
电化学加工	了解电化学加工的原理； 熟悉电解和电铸加工的工艺和应用	电化学加工的原理； 电解和电铸加工的工艺和应用

15.1 概 述

特种加工方法是指区别于传统切削加工方法，利用化学、物理(电、声、光、热、磁)或电化学方法对工件材料进行加工的一系列加工方法的总称。种类有化学加工(CHM)、电化学加工(ECM)、电化学机械加工(ECMM)、电火花加工(EDM)、超声波加工(USM)、激光束加工(LBM)、离子束加工(IBM)、电子束加工(EBM)、等离子体加工(PAM)、电液加工(EHM)、磨料流加工(AFM)、磨料喷射加工(AJM)、液体喷射加工(HDM)及各类复合加工等。

高能束流加工是特种加工技术的重要分支之一，是20世纪60年代迅速发展起来的工艺技术。通常将激光加工(简称LBM)、电子束加工(简称EBM)和离子束加工(简称IBM)称之为高能束加工，亦称三束加工。三者共同之处是以具有很高能量密度的束流，通过一定的装置在空间传输并在工件表面聚焦，从而去除工件材料或完成其他用途。不同之处在于所用的能量载体不同，分别为光子、电子、离子，因而其加工机理、功能、效果和使用范围就有所不同。

电火花加工和电化学加工都是利用电极与工件之间的放电腐蚀效应进行加工的，都属于电加工的范畴。显著特点是加工精度高，能克服传统加工对高硬度材料加工的缺点，“以柔克刚”，在模具制造领域有重要的应用。

本章将介绍以上五种特种加工方法。

15.2 激光束加工

激光束加工是一种高能束加工方法，它是利用激光高强度、高亮度、方向性好、单色性好的特性，通过一系列的光学系统聚焦成平行度很高的微细光束(直径几微米至几十微米)，获得极高的能量密度(108～1010W/cm²)照射到材料上，使材料在极短的时间内(千分之几秒甚至更短)，光能转变为热能，被照部位迅速升温(上万摄氏度)，材料发生气化、熔化、金相组织变化以及产生相当大的热应力，从而实现工件材料被去除、连接、改性或分离等加工。

1960年，美国休斯实验室的梅曼使用红宝石作为工作物质，制出了世界上第一台固体激光器(图15.1)，成功地产生了波长为694.3nm的可见激光。随着大功率激光器的出现，应用激光进行材料加工的激光加工技术逐渐发展起来。

从原理上讲，自然界中几乎所有材料，都能采用激光加工。从行业来说，激光加工涉及服装、皮革、家装、汽车、电子电器、精密机械以及运输机械等所有领域。其特点是不受材料限制、加工效率高、精度高等优势。激光加工工艺包括打孔、切割、焊接以及表面淬火、冲击强化、表面合金化、表面熔覆等。

1. 激光打孔

利用激光几乎可在任何材料上打微型小孔。生产化学纤维用的喷丝板，在ϕ100mm直径的不锈钢喷丝板(图15.2)上打一万多个直径为0.06mm的小孔，采用数控激光加工，

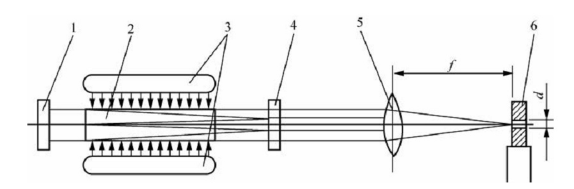


图 15.1　固体激光器加工原理图

1—全反射镜；2—激光工作物质；3—激励光源；
4—部分反射镜；5—透镜；6—工件

不到半天即可完成。激光打孔的直径可以小到 0.01mm 以下，深径比可达 50∶1。

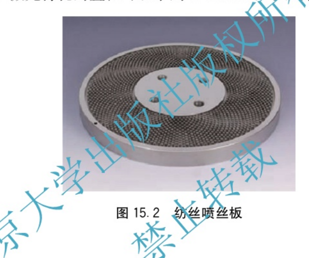


图 15.2　纺丝喷丝板

2. 激光切割

激光切割如图 15.3 所示。采用自动定位系统，杜绝布料的浪费；切割速度可达 300mm/s 以上，加工效率高。

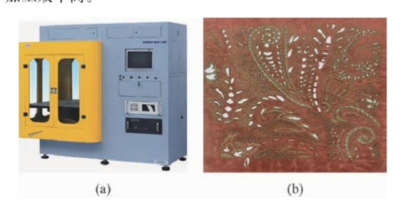


图 15.3　激光雕花机及切割出的皮革制品

3. 激光表面熔覆

由球墨铸铁制造的冲压模具经济实用，且容易进行机械加工，但其存在的问题是零件的表面强度和耐磨性较低。这就需要对材料表面进行硬化处理，通过激光熔覆的方式，使表面获得高的耐磨性。激光熔覆时，熔覆用的金属粉末与激光束同轴，在基体表面形成一

种新的耐磨层，与其他熔覆技术相比，激光熔覆时，作为基体的母材不用预热，金属粉末与基体材料形成冶金结合，表面具有高强度和高耐磨性，如图 15.4 所示。

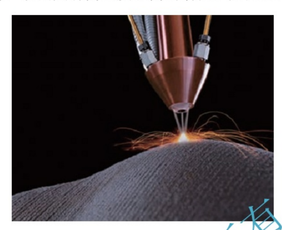


图 15.4 激光表面熔覆

近十年来，激光技术还被应用于快速成形、三维去除加工、微纳米加工中，激光束加工的发展日新月异。

15.3 电子束加工

电子束加工是在真空条件下，利用电子枪中产生的电子经加速、聚焦，形成高能量大密度的细电子束以轰击工件被加工部位，使该部位的材料熔化和蒸发，从而进行加工，或利用电子束照射引起的化学变化而进行加工的方法。

电子束加工原理如图 15.5 所示。在真空条件下，用电流加热阴极 1，产生的电子在高能电场的作用下加速(电子枪)，并经电磁透镜 4 聚焦成高能量、高速度的电子束流，冲击

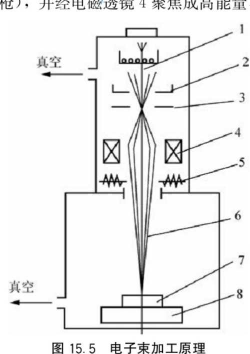


图 15.5 电子束加工原理

—阴极；2—控制栅极；3—阳极；4—电磁透镜；5—偏转器；
6—电子束；7—工件；8—工作台及驱动系统

工件 7 表面极小的面积，冲击过程中其动能转换成热能加热工件，在冲击处形成局部高温，使材料熔化甚至汽化，实现加工。电磁透镜实质上是一个通以直流电源的多匝线圈，电流通过线圈形成磁场，利用磁场力的作用使电子束聚焦，其作用与光学玻璃透镜相似。偏转器 5 也是一个多匝线圈，当通以不同的交变电流时，产生不同的磁场方向，使电子束按照加工需要做相应的偏转。

1949 年，德国首次利用电子束在 0.5mm 厚的不锈钢板上加工出直径为 0.2mm 的小孔。1957 年，法国萨克莱核子研究中心研制成功世界上第一台用于生产的电子束焊接机。20 世纪 60 年代初，电子束打孔、铣切、焊接、镀膜、熔炼等工艺技术已经成功地应用到各工业部门中。电子束加工的优点有：

（1）电子束直径极小，经聚焦后可达微米级，故可加工微孔、窄缝。

（2）电子束功率密度高，足以使任何材料熔化和汽化，能加工高硬度、难熔的金属和非金属材料。

（3）电子束加工时工件受力小，变形小。

（4）加工在真空环境中进行，可防止被加工工件氧化及周围环境对工件材料的污染。

（5）加工过程容易实现自动化。

但电子束加工设备比较复杂，价格昂贵。电子束加工的典型应用有：

1）电子束打孔及型面加工

高能电子束可以加工各种微细孔（孔径 0.003～0.02mm）和型孔、斜孔、弯孔和特殊表面。加工速率高，不受材料特性限制，且加工精度高，表面粗糙度值小。如图 15.6 所示为用电子束加工异型孔示例。

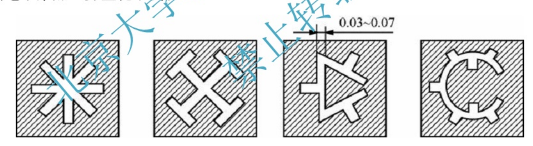


图 15.6 电子束加工的异型孔

2）电子束焊接 ：电子束焊接的可焊材料范围广，除能对普通碳钢、合金钢、不锈钢焊接外，更有利于高熔点金属（钛、钼、钨等及其合金）、活泼金属（锆、铌等）、异种金属（铜—不锈钢、银—白金等）、半导体材料和陶瓷等绝缘材料的焊接。由于电子束的高功率密度和可以在焊缝内侧壁聚焦，因此还能进行窄缝隙、大厚度材料的“深焊”。

3）电子束蚀刻 ：电子束可用来对陶瓷、半导体材料进行精细的蚀刻，加工精细的沟槽和孔。此外还可用来在金属镀层上刻制混合电路的电阻，这是计算机制造中一项重要的工艺手段。

15.4 离子束加工

离子束加工是在真空条件下，将离子源产生的离子束经过加速聚焦，使之具有高的动能能量，轰击工件表面，利用离子的微观机械撞击实现对材料的加工。

离子束加工的物理基础是离子束射到材料表面时所发生的撞击效应、溅射效应和注入效应。

如图 15.7 所示为离子源设备原理，产生离子束流的基本原理和方法是使原子电离，具体方法是把要电离的气态原子(惰性气体或金属蒸气)注入电离室，经高频放电、电弧放电等进行电离，得到等离子体(即正离子数和负电子数相等的混合体)，用一个相对于等离子体为负电位的电极，吸收引出离子束流。

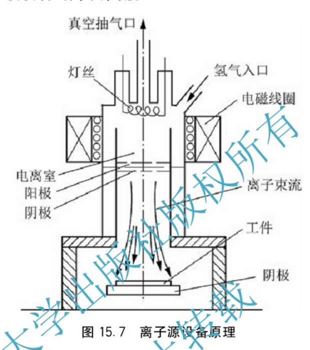


图 15.7　离子源设备原理

离子束加工的应用主要有以下几个方面：

1. 离子束刻蚀加工

离子束刻蚀是从工件上去除材料，是一个撞击溅射过程。当离子束轰击工件，入射离子与靶原子碰撞时将动能传递给靶原子，使其获得的能量超过原子的结合能，导致靶原子发生溅射，从工件表面溅射出来，以达到刻蚀的目的。离子束刻蚀可以在高精度加工、表面抛光、石英晶体谐振器制作等方面得到应用。

离子束刻蚀可达到很高的分辨率，适合刻蚀精细图形，比如：加工成形的毛细管。离子束还能完成机械加工中的最后一道工序——精抛光，以消除机械加工所产生的刻痕和表面应力。采用离子束抛光可以加工石英晶体谐振器晶体表面沟槽，可以解决极薄的晶片不能承受压力的问题，如图 15.8 所示。

2. 溅射镀膜加工

溅射镀膜是基于离子轰击靶材时的溅射效应。离子束在电场或磁场的加速下飞向阴极靶材，阴极表面靶原子溅射至靶材附近的工件表面，形成镀膜。自 20 世纪 70 年代磁控溅射技术的出现，使溅射镀膜进入了工业应用，在镀膜的工艺领域中占有极为重要的地位。高速钢刀具上用磁控溅射镀氮化钛(TiN)超硬膜，大大提高刀具的寿命。汽车轮毂用磁控溅射进行镀膜，可以提高美观度和耐用度，如图 15.9 所示。真空磁控溅射镀膜机广泛应用于家用电器、钟表、灯具、工艺美术品、玩具、车灯反光罩、手机按键外壳以及仪器仪表、塑料、玻璃、陶瓷、瓷砖等表面装饰性镀膜及工模具的功能涂层。

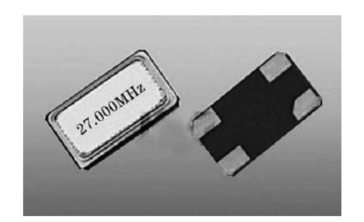


图 15.8 石英晶体谐振器



(a) (b)

图 15.9 汽车轮毂及真空磁控溅射镀膜机

15.5 电火花加工

电火花加工是在一定的介质中，通过工具电极和工件电极之间的脉冲放电的电蚀作用，对工件进行加工的方法。如图 15.10 所示，工具电极 3 与工件 5 一起置于介质 4(煤油或其他液体)中，并分别与脉冲电源 2 的负极和正极相连接。加工时，送进机构 1 移动工具电极使其逐渐趋近工件，当工具电极与工件之间的间隙小到一定程度时，介质被击穿，在间隙中发生脉冲放电。放电的持续时间极短，只有 10^{-8}～10^{-6}s，而瞬时的电流密度极大，可达 10^5～10^7A/cm^2，温度可高达 10000℃以上，致使工件表面局部金属材料被软化、熔化甚至汽化。在瞬时放电的爆炸力作用下，熔化、汽化了的金属材料被抛入液体介质冷凝成微小的颗粒，并从放电间隙中排除出去。

每次放电即在工件表面形成一个微小的凹坑(称为电蚀)，连续不断的脉冲放电，使工件表面不断地被蚀除，因而逐渐完成加工要求，图 15.11 所示为经过多次脉冲放电后形成的电蚀坑。脉冲放电过程中，由间隙自动调节器驱动工具电极自动进给，保持其与工件的间隙，以维持持续的放电。

1943 年，前苏联学者拉扎连科夫妇研究发明电火花加工，最初使用的脉冲电源是简

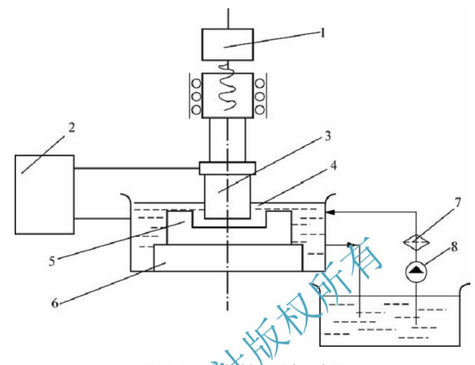


图 15.10 电火花加工设备示意图

1—自动进给调节装置；2—脉冲电源；3—工具；4—工作液；
5—工件；6—工作台；7—过滤器；8—工作液泵

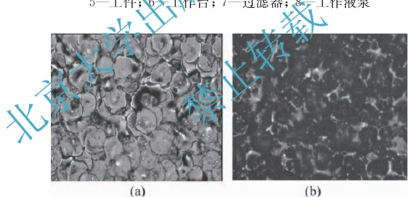


图 15.11 多次脉冲放电后形成的电蚀坑

单的电阻-电容回路，后来脉冲电源改进为电阻-电感-电容回路。同时，还采用脉冲发电机之类的所谓长脉冲电源，使蚀除效率提高，工具电极相对损耗降低。第一台线切割放电机于 1960 年发明于前苏联。

按照工具电极的形式及其与工件之间相对运动的特征，可以将电火花加工分为：

(1) 利用成形工具电极，相对工件作简单进给运动的电火花成形加工；

(2) 利用轴向移动的金属丝作工具电极，工件按所需形状和尺寸作轨迹运动，以切割导电材料的电火花线切割加工；

(3) 利用金属丝或成形导电磨轮作工具电极，进行小孔磨削或成形磨削的电火花磨削，如图 15.12 所示。

下面将简单介绍电火花线切割加工的原理、工艺特点和应用。

电火花线切割加工(Wire Cut EDM，WEDM)是在电火花加工基础上，于 20 世纪 50 年代末在前苏联发展起来的一种新的工艺形式，是靠火花放电对工件进行切割，也简称线

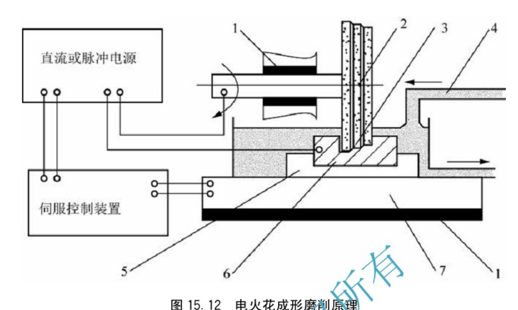


图 15.12 电火花成形磨削原理

1—绝缘；2—导电磨轮；3—火花间隙；4—工作液；5—夹具；6—工件；7—工作台

切割。这种加工工艺应用广泛，目前国内外的线切割机床已占电加工机床的60%以上。

电火花线切割加工的基本原理是利用移动的细金属导线(铜丝或钼丝)作电极，对工件进行脉冲火花放电、切割成形，如图15.13所示。

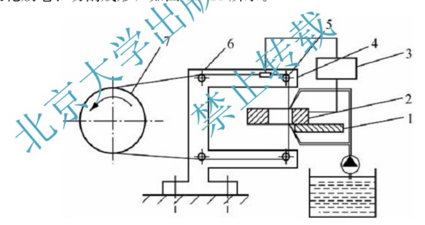


图 15.13 电火花线切割加工原理图

1—绝缘底板；2—工件；3—脉冲电源；4—钼丝；5—导向轮；6—支架；7—储丝筒

线切割加工的特点：

(1) 不需设计和制造成形工具电极，大大降低了加工费用，缩短了生产周期。

(2) 工具电极和工件不直接接触，无宏观切削力，适宜于加工低刚度零件及细小零件。

(3) 无论工件硬度如何，只要是导电或半导电的材料都能进行加工。

(4) 切缝可窄达仅0.005mm，只对工件材料沿轮廓进行“套料”加工，材料利用率高，能有效节约贵重材料。

按走丝方式，电火花线切割可以分为快走丝(WEDM-HS)和慢速走丝(WEDM-LS)。快走丝所采用的电极丝常为钼丝。钼丝作高速往复运动，一般走丝速度为8～10m/s，电极丝可重复使用，加工速度较高。快速走丝容易造成电极丝抖动和反向时停顿，使加工质量下降。一般而言，快走丝的尺寸精度最高可达0.01mm。慢速走丝的电极丝常为铜丝，



图 15.14　线切割加工机床

电极丝作低速单向运动，一般走丝速度低于 0.2m/s，电极丝放电后不再使用，工作平稳、均匀、抖动小、加工质量较好，但加工速度较低，慢走丝的尺寸精度高，可达到 0.003mm。图 15.14 所示为一台慢走丝切割加工机床。

线切割加工适用于模具加工，适用于各种形状的冲模。调整不同的间隙补偿量，只需一次编程就可以切割凸模、凸模固定板、凹模及卸料板等，还可加工挤压模、粉末冶金模、弯曲模、塑压模等通常带锥度的模具。线切割也加工形状复杂的精密零件，如图 15.15 所示。



图 15.15　线切割加工的精密零件

15.6　电化学加工

电化学加工(Electrochemical Machining，ECM)的工作原理是：电解质溶液中正、负离子在电场作用下定向移动，在阴极发生还原反应，在阳极发生氧化反应，从而去除工件材料或在工件表面镀覆其他金属材料的过程，如图 15.16 所示。

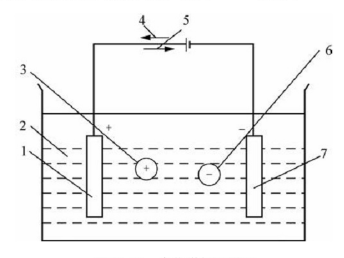


图 15.16　电化学加工原理

—阳极；2—电解溶液；3—阳离子；4—电流方向；5—电子流方向；6—阴离子；7—阴极

电化学加工可以分为两大类，第一种是利用阳极金属的溶解作用进行去除材料的加工方法，如电解加工，电解抛光。被加工工件为阳极，工件金属在电场作用下失去电子变成金属离子，金属离子又与电解液中的氢氧根化合沉淀，逐渐将工件一层层地蚀除。

$$M(金属/工件) - e \rightarrow M^{+}(金属离子)$$

$$M^{+} + (OH)^{-} \rightarrow M(OH) \downarrow (沉淀)$$

电解加工工艺如图 15.17 所示。在工件和工具电极之间接 6～24V 的直流电源，工件接正极(阳极)，工具接负极(阴极)，两者之间保持较小的间隙(通常为 0.02～0.7mm)，在间隙处通以 6～60m/s 的高速流动的电解液，形成极间导电通路。当在工件和工具之间施加一定的电压时，工件表面的金属就不断地产生阳极溶解，并不断被电解液冲走，为保证加工精度，工具电极必须保持一定的加工间隙，这由电极送进机构完成。

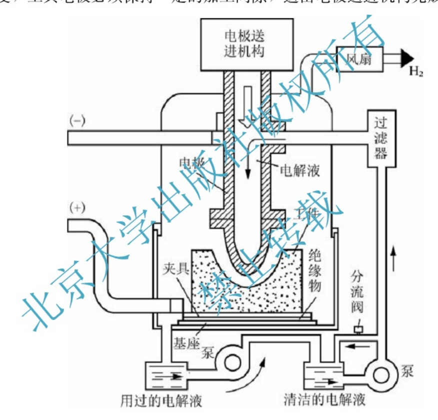


图 15.17 电解加工示意图

电解加工的应用包括模腔加工、型孔加工、型腔加工、叶片加工展成等，如图 15.18 所示。

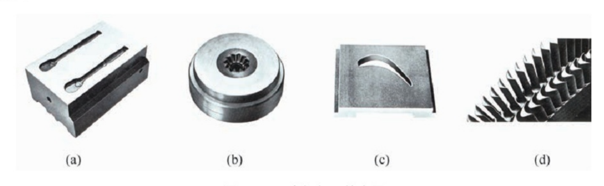


图 15.18 电解加工的应用

第二种是利用金属在阴极的沉积镀覆作用进行加工的方法，如电铸，电镀。其工作机理是：

$$M^{+} + e \rightarrow M\text{（金属）}$$

电化学加工可以加工任何金属，加工中无切削力、切削热，无毛刺和倒棱，多个面同时加工，效率高，不足之处是有污染和腐蚀，电解液难处理。这里介绍一下电铸加工。

电铸加工（图 15.19）是用导电的原模做阴极，用于电铸的金属作阳极，阳极金属材料与金属盐溶液中的金属离子的种类相同，以保持电铸液中金属离子浓度不变。其实质是电铸溶液中的金属离子在阴极还原成金属，沉积于原模表面。

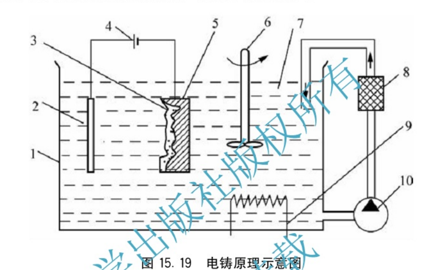


图 15.19　电铸原理示意图

1—电铸槽；2—阳极；3—电铸层；4—直流电源；5—原模（阴极）；6—搅拌器；7—电铸液；8—过滤器；9—加热器；10—泵

电铸工艺过程如图 15.20 所示。

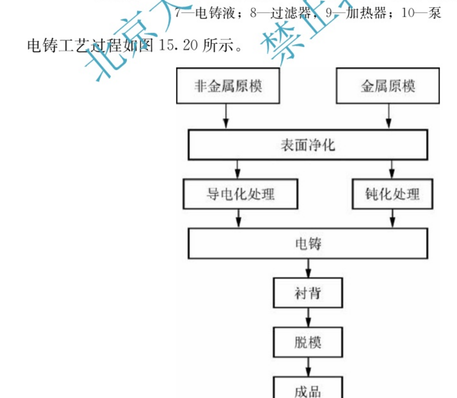
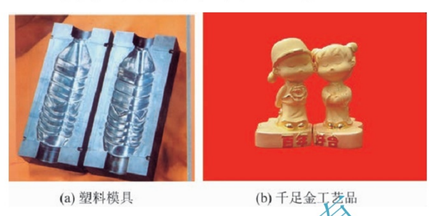


图 15.20　电铸加工工艺过程

电铸加工可以用于制造形状复杂、精度高的空心零件，注塑用的模具、厚度仅几十微米的薄壁零件，还可以复制金属的艺术品等，如图 15.21 所示。



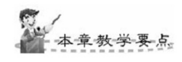
(a) 塑料模具　(b) 千足金工艺品

图 15.21　电铸加工应用

思考及实践

1. 激光加工有哪些应用?
2. 电子束加工有什么特点?
3. 同样是打孔，电子束加工和激光束加工有何不同的特点?
4. 参观集成电路的生产，了解一下离子束加工和电子束加工在光刻中的应用。
5. 电火花线切割加工和成形加工有什么不同?
6. 现在人们对环保要求越来越高，电化学加工该向何处发展?

第16章 3D打印技术



知识要点	掌握程度	相关知识
3D打印的概念和产生背景	掌握3D打印技术的概念； 了解3D打印的技术和市场背景	3D打印的概念； 3D打印的技术和市场背景
3D打印的工作原理及过程	掌握3D打印的工作原理； 了解3D打印的特点	3D打印的工作原理； 3D打印的特点
典型的3D打印技术	熟悉SLA、LOM、SLS的特点和应用； 了解SLA、LOM、SLS的设备	SLA、LOM、SLS的特点和应用； SLA、LOM、SLS的设备
3D打印的前景	了解3D打印技术在未来的医学、建筑、航空等诸多领域的应用前景	3D打印技术在诸多领域的应用前景

16.1 概　　述

3D打印技术是由CAD模型直接驱动的快速制造任意复杂形状三维实体的技术总称，也被称作“增材制造”或快速原型制造(Rapid Prototyping & Manufacturing，RPM)。

3D打印的产生有三个方面的背景，一是创新思维背景，它完全颠覆了传统的去除材料的加工方法，取而代之的是“从无到有”的加工方法；二是技术背景，它是机械工程、计算机技术、数控技术以及材料科学等技术的集成；三是市场背景，为了提高产品市场竞争力，从产品开发到批量投产的整个过程都迫切要求降低成本和提高速度。

2011年，英国布里斯托尔的科学家设计制作出一种独特的自行车。他们先在计算机上设计出自行车的形状，然后用印刷机将其打印出来，并将融化的尼龙水涂在每辆设计好的自行车上，这样就完成了。据报道，这种自行车和钢铝制成的自行车一样结实耐用，但是重量却减轻了65%，如图16.1所示。



图16.1　三维打印自行车

同年，由华中科技大学史玉升教授牵头研发的世界最大激光快速制造装备(3D打印机)入选了“2011年中国十大科技进展新闻”。

相对于传统的材料切削成形，3D打印的材料叠加成形是一种重大创新。无需机械加工或模具，可极大缩短产品研制周期，随时随地制造出所需物品。3D打印机是一种新型加工装备，既是制造工艺的原理创新，也是应用数字化技术的产品创新，将有可能改变整个制造业的面貌。

随着技术的成熟和成本的下降，3D打印技术正在从概念走向实用，从国防走向民用，成为一项改变我们生活的技术。

16.2 3D打印的工作原理

快速原型制造利用的是“先离散后堆积成形”的原理。即：先生成产品的三维计算机模型，然后，离散为二维平面信息，采用数控加工并逐层堆积黏接，即可生成实体模型，如图16.2所示。

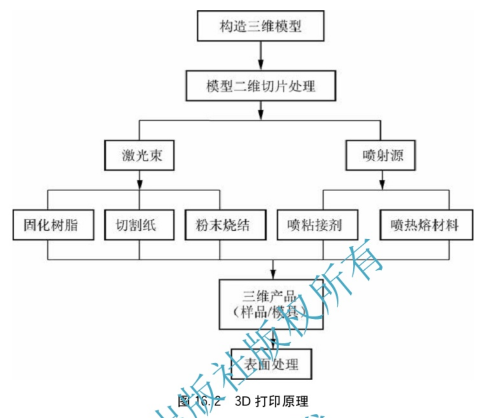


图 16.2　3D 打印原理

使用 3D 打印技术就像打印一封信：轻点电脑屏幕上的“打印”按钮，一份数字文件便被传送到一台喷墨打印机上，它将一层墨水喷到纸的表面以形成一幅二维图像。而在 3D 打印时，软件通过电脑辅助设计技术(CAD)完成一系列数字切片，并将这些切片的信息传送到 3D 打印机上，后者会将连续的薄型层面堆叠起来，直到一个固态物体成形。3D 打印机与传统打印机最大的区别在于它使用的“墨水”是实实在在的原材料。

与传统的切削加工方法相比，3D 打印具有以下优点：

(1) 可迅速制造出自由曲面和更为复杂形态的零件(模具)，加工效率高，大大降低了新产品的开发成本和开发周期。

(2) 多采用特种加工技术实现，属非接触加工。不需要机床切削加工所必需的刀具和夹具，无刀具磨损和切削力影响。无振动、噪声和切削废料。

(3) 可实现夜间完全自动化生产。

16.3　典型的 3D 打印技术

3D 打印技术的发展已经有 30 年的历史，已经有非常多的技术分支，下面介绍一下主流的三种技术。

1. 立体光固化法(Stereo Lithography Appearance，SLA)

立体光固化法(图 16.3)是以光敏树脂为原料，通过计算机控制紫外激光使其固化成形，自动制作出复杂立体形状。1984 年，由 Charles Hull 提出并获美国专利。1988 年，美国 3D System 公司推出世界上第一台商品化 RP 设备 SLA－250，在制造领域具有划时

代的意义。目前SLA已成为世界上研究最深入、技术最成熟、应用最广泛的一种快速原型制造方法。

SLA设备主要由激光器、激光束扫描装置、光敏树脂、液槽、升降台和控制系统等六个部分组成。其工作原理是液态光敏树脂的光聚合原理。液态光敏树脂在一定波长($\lambda=325$nm)和功率($P=30$mW)的紫外光照射下能迅速发生光聚合反应，分子量急剧增大，材料就从液态转变成固态。如图16.3所示控制系统驱动升降台上下运动，可以实现。

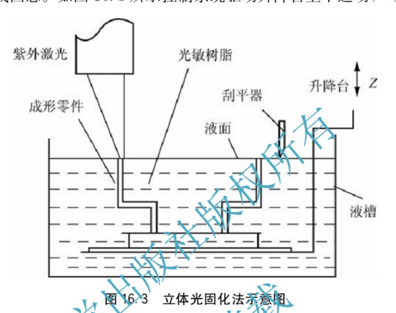


图16.3 立体光固化法示意图

采用SLA工艺，制成的产品原型尺寸精度高，可以达到±0.1mm，而且表面质量好。由于可以实现数字控制，自动化程度高。原材料利用率高几乎可以达到100%。能制造形状特别复杂(如空心零件)、特别精细(如首饰、工艺品等)的零件。

缺点是成形过程中需要支撑，否则会引起制件变形，设备运转及维护成本高等。由于产品的力学性能较差，主要用于快速制造产品原型。

2. 层叠制造法(Laminated Object Manufacturing，LOM)

1984年，Michael Feygin提出LOM，1985年，Michael Feygin在美国加州托兰斯组建Helisys公司，并于1990年推出了世界上第一台商业机型。

LOM工艺原理(图16.4)是采用薄片材料，如纸、塑料薄膜等作为成形材料，片材表面事先涂覆上一层热熔胶。加工时，用CO_2激光器(或刀)在计算机控制下按照CAD分层模型轨迹切割片材，然后通过热压辊热压，使当前层与下面已成形的工件层黏接，从而堆积成形。

LOM成形工艺过程分为以下四个步骤：

(1) 基底制作：由于叠层在制作过程中要由工作台带动频繁升降，为实现原型与工作台之间的连接，需要制作基底，通常制作3～5层。为保证基底的牢固，在制作基底之前要将工作台预热。

(2) 由设备根据给定的工艺参数自动完成原型所有叠层的制作过程。

(3) 余料去除：主要是将成形过程中产生的网状废料与工件剥离，通常采用手工剥离的方法。

(4) 后处理：余料去除以后，为提高原型表面状况和机械强度，保证其尺寸稳定性、

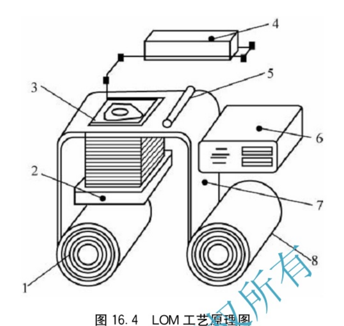


图 16.4　LOM 工艺原理图

1—收料轴；2—升降台；3—加工平面；4— CO_2 激光器；
5—热压辊；6—控制计算机；7—料带；8—供料轴

精度等方面的要求，需对原型进行后置处理，如修补、打磨、抛光、表面涂覆等，经处理的 LOM 原型表现出类似硬木的效果和性能。

采用 LOM 工艺，生产效率高，零件精度较高(小于 0.15mm)，无需设计和制作支撑结构，后处理工艺简单，原型制作成本低，制件能承受高达 200℃的高温。不足之处是工件(尤其是薄壁件)抗拉强度和弹性不够好，易吸湿膨胀，因此成形后应尽快做表面防潮处理等。

3. 激光选区烧结法(Selective Laser Sintering，SLS)

激光选区烧结法是美国德克萨斯大学奥斯汀分校的 Carl ckard 于 1989 年提出的，1992 年，美国 DTM 公司推出了该工艺的商品化设备 Sinter Sation。二十年来，国内也有多家单位进行 SLS 的相关研究工作，成绩比较显著的有华中科技大学和北京隆源自动成形有限公司等。

选择性激光烧结工艺原理(图 16.5)是：利用粉末状材料(主要有塑料粉、蜡粉、金属粉、表面附有黏结剂的覆膜陶瓷粉、覆膜金属粉及覆膜砂等)在激光照射下烧结的原理，在计算机控制下层层堆积成形。

选择性激光烧结系统由机械系统、光学系统和计算机控制系统组成。机械系统和光学系统在计算机控制系统的控制下协调工作，自动完成制件的加工成形。机械结构组成包括：机架、工作平台、铺粉机构、两个活塞缸、集料箱、加热灯和通风除尘装置，如图 16.6 所示。

选择性激光烧结出来的零件比 SLA 要结实的多，通常可以用来制作结构功能件(图 16.7)，材料多样且利用率高，未烧结的粉末可以重复利用。材料价格较便宜、成本低。

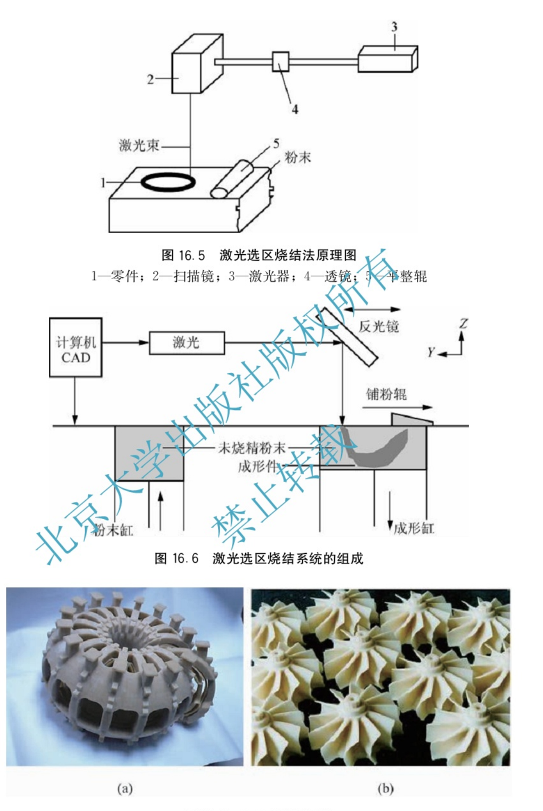


图 16.5 激光选区烧结法原理图

1—零件；2—扫描镜；3—激光器；4—透镜；5—平整辊

图 16.6 激光选区烧结系统的组成

图 16.7 SLS 成形的零件

16.4 3D打印的前景

首届世界3D打印技术产业产业大会于2013年5月29日在中国北京开幕，世界3D打印技术产业联盟也同期成立。3D打印技术作为一项前沿性、先导性非常强的新兴技术，对传统制造业的工艺改造和新材料的广泛应用具有颠覆性的意义和作用，已经被世界各国所公认，但其未来的产业化还有一个漫长的过程。

美国学者杰里米·里夫金在其著作《第三次工业革命》指出，互联网和新能源相结合，将催生“第三次工业革命”。英国《经济学人》杂志将3D打印技术称为引领第三次工业革命的关键之一。3D打印技术将在未来数十年内彻底改变制造业和人类的生活方式。据估计，预计未来三年，中国的3D打印产业国内市场规模可以达到百亿元。

3D打印技术与3D打印机未来一定会进入家庭，而且时间不会太长，就像当年前的苹果手机一样的，既新鲜又不可阻挡。

事实胜于雄辩，还是让我们一起通过最新的3D打印技术的应用实例，来憧憬一下3D打印技术的未来前景吧。

对于天底下所有的父母来说，第一次在超声波检查中看到他们未出生的宝宝影像，绝对是生命中一个非常激动人心的重要时刻。巴西工业设计师Dos Santos将3D打印与超声波扫描技术结合，让医生能够给父母打印出1∶1的胚胎。将超声波取得的数据输入3D打印机就可制作3D模型。父母如果愿意保存3D打印的胎儿作为孩子的成长记录，需要为12周的胚胎3D模型支付约200美元，24周的胚胎模型则需要300美元(图16.8)。



图16.8 3D打印的胚胎

2012年，英国伦敦的一家建筑企业Softkill Design率先提出了3D打印房屋(图16.9)的新概念——原材料来自塑料，外观像蜘蛛网。设计成员之一的吉尔·瑞特森表示，这项发明不仅对房屋建筑行业是一场革新，甚至还有望解决英国的住房危机。按照发明者的设计：将所有的组件制造好，需要三个星期的时间，装配起来则仅需一天的功夫。这种房屋将用维可牢尼龙搭扣或类似按钮的紧固件固定在一起，而这些在传统建筑技术中则不需要。

2012年，美国弗吉尼亚大学工程系研究人员制造了一架3D打印无人飞机(图16.10)，巡航时速可达到45英里。这个飞机是由美国弗吉尼亚大学工程系学生研制的，它的机翼



图 16.9　3D 打印房屋的构想

宽 6.5 英尺，是由打印零件装配构成。传统的飞机制造技术，从概念到模拟再到实体，需要一个漫长的过程。而采用三维打印技术，则只要有 3D 图纸就可“打印”，可以极大地缩短飞机制造的周期。



图 16.10　3D 打印的无人飞机

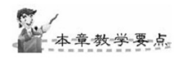
既然尚在腹中的胎儿能打印，我们人类未来的房子能打印，翱翔蓝天的飞机也能打印，那似乎没有 3D 打印不能实现的东西了：汽车、人体器官、骨骼、艺术品等等。未来的 3D 打印会给你的生活带来什么样的变化呢？让我们拭目以待。

思考及实践

1. 3D 打印技术产生的市场背景是什么？
2. 为什么说 3D 打印是一种原理性创新的技术？
3. 3D 打印的工作过程是怎样的？到学校的先进制造实验室参观一下。
4. 3D 打印有哪几种主流的技术？
5. 查找资料，了解一下 3D 打印技术的最新发展。
6. 试想一下，3D 打印技术如果不加以正确引导和控制，会带来哪些问题呢？

第17章

现代制造装备与自动化



知识要点	掌握程度	相关知识
三维测量技术	掌握三坐标测量机的结构及工作原理； 了解非接触测量方法	三坐标测量机的床式桥架型结构和测量采样过程； 三维光学测量方法和计算机视觉测量方法
工业机器人	了解机器人特别是工业机器人的发展历程； 熟悉工业机器人的组成和分类； 了解示教型机器人的工作过程	机器人的概念和工业机器人的发展过程； 工业机器人的三大组成部分； 工业机器人在汽车制造中的应用
CAD/CAE/CAPP/CAM	掌握CAD、CAE、CAPP和CAM的概念； 了解CAD、CAE、CAPP和CAM之间的关系和有关软件	CAD、CAE、CAPP和CAM的概念； CAD、CAE、CAPP和CAM之间的关系和商业软件的应用
柔性制造系统	了解柔性制造系统产生的背景和概念； 掌握柔性制造系统的组成； 了解柔性制造系统的分类	柔性制造系统的产生和发展； 柔性制造系统的三大组成部分； 柔性制造系统的三种类型
计算机集成制造系统	了解CIMS的概念和产生背景； 了解CIMS的组成和实施的价值	CIM哲理和CIMS的概念； CIMS的各大子系统组成及信息集成

17.1 概　　述

现代制造装备产生于20世纪中期，其背景有多方面的原因。首先是越来越激烈的市场竞争，产品市场的中心从制造商为中心转移到客户为中心，产品需求逐渐呈现出多样化、个性化的特点，人们不再满足于“吃饱穿暖”，而是“品质高雅、个性十足”，因此，生产方式也从成批大量生产转向面向订单、面向客户的多品种、小批量生产。企业竞争力主要体现为成本和交货周期(快速响应)。由于客户需求的变化和生产方式的改变，使得现代制造装备既要高效也要必须具备一定的柔性。

现代制造装备范围很广泛，包括各种数控机床、三坐标测量机、工业机器人、柔性制造系统、计算机集成制造系统。同时，要实现制造的自动化，离不开现代信息技术的应用，包括：计算机复制设计(CAD)、计算机辅助工程分析(CAE)、计算机辅助工艺规程设计(CAPP)、计算机辅助制造(CAM)的集成应用。本章将介绍除数控机床之外的各种现代制造装备和CAD/CAE/CAPP/CAM。

17.2 三维测量技术

1. 接触式测量

接触式测量的典型代表是三坐标测量机(Coordinate Measuring Machines，CMM)。它以精密机械为基础，综合应用了电子技术、计算机技术、光学技术和数控技术等先进技术。测量过程中，首先将各种几何元素的测量转化为这些几何元素上的点集坐标位置的测量，然后再由软件按一定的评定准则算出这些几何元素的尺寸、形状和相对位置等，它的坐标测量精度可以达到μm量级。

1959年，世界上第一台三坐标测量机诞生于英国。世界第一台CNC三坐标测量机—UMM500，由德国Zeiss(蔡司)公司于20世纪七十年代中期制造。三坐标测量机具有高准确度、高效率、测量范围大等优点，在机械、汽车、航空等行业得到了广泛应用。如今，三坐标测量机已经成为现代制造企业不可或缺的精密测量工具，是衡量企业质量体系好坏的重要指标。

最常见的三坐标测量机的组成结构是床式桥架型，如图17.1所示。沿三个导轨运动的方向构成直角坐标系，测头通过三个坐标轴导轨可在三个空间方向自由移动，在测量范围内到达任意一个测点。三个轴上装有测长元件，从而可以测出测点在X，Y，Z三个方向上的精确坐标位置。现代的三坐标测量机为计算机数控型，可按层序通过数控伺服机构控制计算机进行自动测量。测头安装在Z轴的端部，现代的测头多为触发式动态测头，测头在向工件表面碰触的运动过程中，在接触的瞬间进行测量采样。

尽管三坐标测量机的测量精度高，但是这种依靠接触逐点取样的方法，测量效率比较低，较大的工件的测量可能要花费数小时乃至十几个小时。而且，三坐标测量机一般要安装在专门的测量室内，被测工件要拿到测量室才能测量，对有些大型工件非常不方便，对

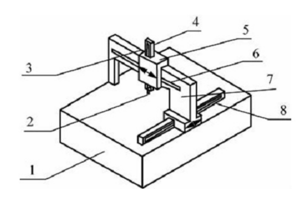


图 17.1 三坐标测量机组成示意图

1—工作台；2—测头；3—Z 轴光栅尺；4—Z 轴；5—中央滑架；
6—Y 向光栅尺；7—移动桥架；8—X 向光栅尺

加工过程中的测量可能还会带来二次安装误差的问题。

机械测量臂(图 17.2)也是接触式测量方法中不断发展的一种三维测量技术，如 FARO 公司研制的机械测量装置可以测量飞机发动机、卫星天线及汽车等产品上的大型复杂曲面。它同样沿用 CMM 的测量原理，一定程度上克服了 CMM 控制复杂和不能现场使用的缺点，但测量速度还不能满足脱离手动、快速测量的要求。



图 17.2 采用机械测量臂进行检测

2. 非接触测量

非接触测量主要分为：非光学法和光学方法。在非光学测量方法中，主要利用物体对信号的反射、吸收等特性使信号被物体调制，然后通过分析被调制的信号来计算被测物体的信息，非光学法主要包括利用发射和接收电磁波信号的雷达成像(RI)；利用声波信号的超声波成像(UI)；利用物体对 X 射线吸收的计算机体层摄影(CT)等。非光学方法多应用于诸如军事、医学等特定专业领域，通常造价较高，精度和分辨度也有较大差异。

光学方法测量根据采用的照明方式的不同可以分为两类：(1)主动式方法。是指向被测物体发射可控制光束，然后拍摄光束在物体表面上所形成的图像，通过几何关系计算出被测物体距离的方法。主要可以分为结构光方法和激光自动聚焦法两类；(2)被动式方法。是指不向被测物体发射可控制光束，而根据直接拍摄的物体的图像进行物体三维测量的方法。主要可以分为单目视觉、双目视觉、多目视觉等方法。光学三维测量技术由于其非接

触性、高精度与高分辨率，在 CAD/CAE、逆向工程、在线检测与质量保证、医疗诊断等领域得到日益广泛的应用，被公认是最具特色、最有前景的三维轮廓测量技术。

在光学方法中，计算机视觉技术在电子学、图像处理和计算机等技术不断成熟和完善的基础上得到迅速发展，它的一个应用重点在于物体的几何尺寸测量和物体的空间方位的确定。比如：一个由多个视觉传感器组建的柔性空间三坐标测量系统，可以完成对大型物体的三维空间尺寸的全自动实时测量，如图 17.3 所示为美国 Perceptron 公司的机器人引导的多传感器视觉测量系统。



图 17.3 美国 Perceptron 公司的机器人引导的多传感器视觉测量系统

计算机视觉检测具有精度高、速度快、非接触、柔性好、自动化和智能化水平高等特点，在在线测量、逆向工程等主动、实时测量过程中具有广阔的应用前景，如轿车白车身三维尺寸的测量、注塑件三维测量检测、大型工件直线度、垂直度、同轴度测量等，已经成为当今世界各国竞相发展的一项高新技术。

17.3 工业机器人

工业机器人是面向工业领域的多关节机械手或多自由度的机器人。工业机器人是自动执行工作的机器装置，是靠自身动力和控制能力来实现各种功能的一种机器。它可以接受人类指挥，也可以按照预先编排的程序运行，现代的工业机器人还可以根据人工智能技术制定的原则纲领行动。工业机器人(IR)是整个制造系统自动化的关键环节之一，是机电一体化的高技术产物。利用工业机器人，可以搬运物料、零件、工具或完成多种操作。

1920 年捷克作家卡雷尔・查培克在其剧本《罗萨姆的万能机器人》中最早使用机器人一词，剧中机器人“Robot”这个词的本义是“奴隶”，即剧作家笔下的一个具有人的外表，特征和功能的机器，是一种人造的“劳力”，这是最早的工业机器人设想。

20 世纪 50 年代以后，美国橡树岭国家实验室开始研究能搬运核原料的遥控操纵机械手，这是一种主从型控制系统，主机械手的运动。系统中加入力反馈，可使操作者获知施加力的大小，主从机械手之间有防护墙隔开，操作者可通过观察窗或闭路电视对从机械手操作机进行有效的监视，主从机械手系统的出现为机器人的产生，为近代机器人的设计与制造作了铺垫。

1954 年美国戴沃尔最早提出了工业机器人的概念，并申请了专利。该专利的要点是借助伺服技术控制机器人的关节，利用人手对机器人进行动作示教，机器人能实现动作的记录和再现。这就是所谓的示教再现机器人。现有的机器人差不多都采用这种控制方式。1959 年 UNIMATION 公司的第一台工业机器人在美国诞生，开创了机器人发展的新纪元，该机器人采用了伺服机构和自动控制等技术。1969 年，美国通用汽车公司用 21 台工业机器人组成了焊接轿车车身的自动生产线。此后，各工业发达国家都很重视研制和应用工业机器人。日本第一台机器人由 KAWASAKI 从 UNIMATION 进口，并由 KAWASA-

KI模仿改进在国内推广。由于工业机器人具有一定的通用性和适应性，能适应多品种中、小批量的生产，70年代起，常与数字控制机床结合在一起，成为柔性制造单元或柔性制造系统的组成部分。

工业机器人一般由执行机构、控制系统、驱动系统三部分组成(图17.4)。执行机构包括臂部、腕部和手部。大多数工业机器人有3～6个运动自由度，其中腕部通常有1～3个运动自由度；驱动系统包括动力装置和传动机构，用以使执行机构产生相应的动作；控制系统是按照输入的程序对驱动系统和执行机构发出指令信号，并进行控制。

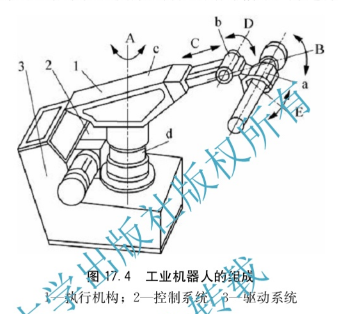


图17.4　工业机器人的组成

1—执行机构；2—控制系统；3—驱动系统

工业机器人按臂部的运动形式分为四种：(1)直角坐标型：臂部可沿三个直角坐标移动；(2)圆柱坐标型：臂部可作升降、回转和伸缩动作；(3)球坐标型：臂部能回转、俯仰和伸缩；(4)关节型：臂部有多个转动关节。

工业机器人按程序输入方式区分有编程输入型和示教输入型两类。编程输入型是将计算机上已编好的作业程序文件，通过RS232串口或者以太网等通信方式传送到机器人控制柜。

示教输入型的示教方法有两种：一种是由操作者用手动控制器(示教操纵盒)，将指令信号传给驱动系统，使执行机构按要求的动作顺序和运动轨迹操演一遍；另一种是由操作者直接领动执行机构，按要求的动作顺序和运动轨迹操演一遍。在示教过程的同时，工作程序的信息即自动存入程序存储器中，在机器人自动工作时，控制系统从程序存储器中检出相应信息，将指令信号传给驱动机构，使执行机构再现示教的各种动作。示教输入程序的工业机器人称为示教再现型工业机器人。

具有触觉、力觉或简单的视觉的工业机器人，能在较为复杂的环境下工作。如具有识别功能或更进一步增加自适应、自学习功能，即成为智能型工业机器人。它能自编程序去适应环境，并自动完成更为复杂的工作。

工业机器人在工业生产中能代替人做某些单调、频繁和重复的长时间作业，或是危险、恶劣环境下的作业，例如在冲压、压力铸造、热处理、焊接、涂装、塑料制品成形、机械加工和简单装配等工序上，以及在核能工业等部门中，完成对人体有害物料的搬运或工艺操作。如图17.5所示为工业机器人正在进行汽车车门护板的涂胶作业，而图17.6所示为机器人正在焊接和装配汽车。

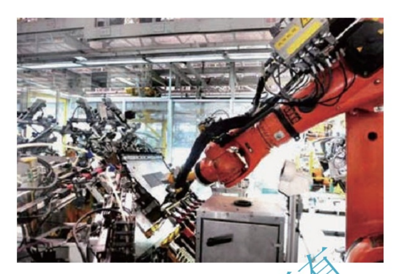


图 17.5 涂装车门护板的工业机器人



图 17.6 正在焊接和装配汽车的工业机器人

在我国，随着企业用工成本不断上涨，给机器人产业带来了重大的发展机遇，工业机器人正逐步走进公众的视野。事实上，中国的制造业正在迅速进入机器人时代。著名的代工企业富士康2011年宣布，未来三年内将在组装工厂生产线上累计部署100万台工业机器人，取代现在简单重复的人力劳动。虽然计划略显夸张，但也表明在人力成本上升的大背景下，工业机器人前景诱人。

17.4 CAD/CAE/CAPP/CAM

1. CAD

计算机辅助设计(Computer Aided Design，CAD)是利用计算机作为工具，帮助设计人员进行设计的一切适用技术的总称。包括：工程图绘制、概念设计、产品造型设计、装配以及相关文档的设计、产品渲染、动态模拟显示、产品工程分析等。

2. CAE

CAE(Computer Aided Engineering，CAE)是用计算机辅助求解复杂工程和产品结构强度、刚度、屈曲稳定性、动力响应、热传导、三维多体接触、弹塑性等力学性能的分析计算以及结构性能的优化设计等问题的一种近似数值分析方法。CAE 系统的核心思想是结构的离散化，即将实际结构离散为有限数目的规则单元组合体，实际结构的物理性能可以通过对离散体进行分析，得出满足工程精度的近似结果来替代对实际结构的分析，这样可以解决很多实际工程需要解决而理论分析又无法解决的复杂问题。

应用 CAE 软件对工程或产品进行性能分析和模拟时，一般要经历以下三个过程：

(1) 前处理：对工程或产品进行建模，建立合理的有限元分析模型；

(2) 有限元分析：对有限元模型进行单元特性分析、有限元单元组装、有限元系统求解和有限元结果生成。

(3) 后处理：根据工程或产品模型与设计要求，对有限元分析结果进行用户所要求的加工、检查，并以图形方式提供给用户，辅助用户判定计算结果与设计方案的合理性。

著名的 CAE 软件有：ADINA，ANSYS，Fluent，ABAQUS，Moldflow，它们分别有其应用的工程场合。

3. CAPP

计算机辅助工艺规程设计(Computer Aided Process Planning，CAPP)就是通过向计算机输入被加工零件的原始数据、加工条件和加工要求，由计算机自动编码、编程、绘图，直至最后输出经过优化的工艺规程卡片。CAPP 技术为实现计算机集成制造提供了必要的技术基础。

自从 1965 年 Niebel 首次提出 CAPP 思想以来，各应用软件公司、研究所以及高校对 CAPP 领域的研究得到了极大的发展，主要经历了检索式、派生式、创成式、混合式、专家系统和工具系统等不同的发展阶段，并涌现出了一大批商品化的 CAPP 系统。但是相对于其他信息管理系统的发展，CAPP 的应用水平仍然比较滞后。

比较常用的 CAPP 软件有开目、金叶、艾克斯特、CAXA 等。

4. CAM

计算机辅助制造 (Computer Aided Manufacturing，CAM)是利用计算机来进行生产设备管理控制和操作的过程。它输入信息是零件的工艺路线和工序内容，输出信息是刀具加工时的运动轨迹(刀位文件)和数控程序。CAM 的核心是数控，是将计算机应用于制造生产过程的过程或系统 CAM 系统一般具有数据转换和过程自动化两方面的功能。

常见的 CAM 软件有：UG NX、Pro/NC、CATIA、MasterCAM、Powermill 等。

由于技术发展的历史原因，CAD、CAE、CAPP 和 CAM 基本上都是各自独立发展起来的，各子系统之间缺乏有机的联系，即由于数据模型彼此不相容，导致各子系统之间无法进行信息的自动传递和交换。随着制造业自动化、信息化和智能化的不断发展以及日趋激烈的市场竞争的迫切需要，各子系统逐渐彼此靠拢，并最终紧密结合(集成)在一起。这样，各子系统之间由于有了统一的数据库和数据接口，便可自动进行信息的传递和交换。从而大大提高工作效率，缩短产品研制周期，增强企业的市场竞争力。

17.5　柔性制造系统

柔性制造系统(Flexible Manufacturing System，FMS)是由统一的信息控制系统、物料储运系统和一组数字控制加工设备组成，能适应加工对象变换的自动化机械制造系统。FMS的概念最早由英国莫林公司(MOLIN)提出并于1967年推出第一套FMS(Molins Systems-24)，该系统可以加工一系列不同零件，把工件安装在托盘上，然后托盘被送到各台数控机床上，每台数控机床配备一个刀库，系统从刀库中选用刀具进行各种不同的加工操作，由一台计算机控制多台机床，可以无人看守，一天24小时自动化运行。

随后，美国、日本、前苏联、德国等也都先后开展了FMS的研制工作。1976年，日本发那科公司展出了由加工中心和工业机器人组成的柔性制造单元(简称FMC)，为发展FMS提供了重要的设备形式。柔性制造单元(FMC)一般由12台数控机床与物料传送装置组成，有独立的工件储存站和单元控制系统，能在机床上自动装卸工件，甚至自动检测工件，可实现有限工序的连续生产，适于多品种小批量生产应用。

随着时间的推移，FMS在技术上和数量上都有较大发展，实用阶段，以由3～5台设备组成的FMS为最多，但也有规模更庞大的系统投入使用。1982年，日本发那科公司建成自动化电机加工车间，由60个柔性制造单元(包括50个工业机器人)和一个立体仓库组成，另有两台自动引导台车传送毛坯和工件，此外还有一个无人化电机装配车间，它们都能连续24小时运转。

FMS是市场需求的产物，它适应了多品种、小批量生产的时代要求，同时，数控技术、计算机技术、机器人技术以及现代管理技术的发展和进步，为FMS的发展提供了条件。

FMS主要由加工系统、物流系统和信息流系统三部分组成。如图17.7所示。

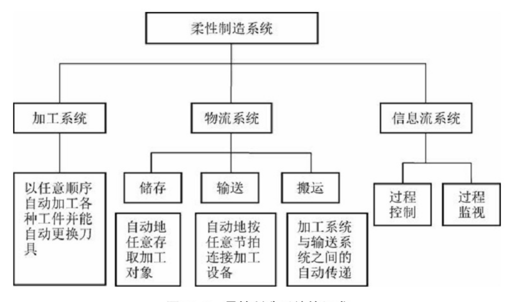


图17.7　柔性制造系统的组成

1）加工系统

加工系统主要采用加工中心和数控车床，前者用于加工箱体类和板类零件，后者则用于加工轴类和盘类零件。中、大批量少品种生产中所用的FMS，常采用可更换主轴箱的加工中心，以获得更高的生产效率。

2）物流系统

物流系统由工件流和刀具流组成，搬运的物料有毛坯、工件、刀具、夹具、检具和切屑等。储存物料的方法有平面布置的托盘库，也有储存量较大的桁道式立体仓库。毛坯一般先由工人装入托盘上的夹具中，并储存在自动仓库中的特定区域内，然后由自动搬运系统根据物料管理计算机的指令送到指定的工位。固定轨道式台车和传送滚道适用于按工艺顺序排列设备的FMS，自动引导小车(AGV)搬送物料的顺序则与设备排列位置无关，具有较大灵活性。工业机器人可在有限的范围内为1～4台机床输送和装卸工件，对于较大的工件常利用托盘自动交换装置(简称APC)来传送，也可采用在轨道上行走的机器人，同时完成工件的传送和装卸。磨损了的刀具可以逐个从刀库中取出更换，也可由备用的子刀库取代装满待换刀具的刀库。车床卡盘的卡爪、特种夹具和专用加工中心的主轴箱也可以自动更换。切屑运送和处理系统是保证FMS连续正常工作的必要条件，一般根据切屑的形状、排除量和处理要求来选择经济的结构方案。

3）信息流系统

信息流系统主要是实现在线数据的采集和处理，对FMS进行计划调度、运行控制、物料管理、系统监控和网络通信等。

柔性制造系统有以下三种类型：

1）柔性制造单元(FMC)

柔性制造单元由一台或数台数控机床或加工中心构成的加工单元。该单元根据需要可以自动更换刀具和夹具，加工不同的工件。柔性制造单元适合加工形状复杂，加工工序简单，加工工时较长，批量小的零件。它有较大的设备柔性，但人员和加工柔性低。

2）柔性制造系统(FMS)

柔性制造系统是以数控机床或加工中心为基础，配以物料传送装置组成的生产系统。该系统由电子计算机实现自动控制，能在不停机的情况下，满足多品种的加工。柔性制造系统适合加工形状复杂，加工工序多，批量大的零件。其加工和物料传送柔性大，但人员柔性仍然较低。

3）柔性自动生产线(FML)

柔性自动生产线是把多台可以调整的机床(多为专用机床)联结起来，配以自动运送装置组成的生产线。该生产线可以加工批量较大的不同规格零件。柔性程度低的柔性自动生产线，在性能上接近大批量生产用的自动生产线；柔性程度高的柔性自动生产线，则接近于小批量、多品种生产用的柔性制造系统。

如图17.8所示为使用了加工状态检测系统FMS，可以看出，通过图像、声发射、电流、切削力等信号的传感、处理和分析，实现快速、准确、稳定可靠的加工系统的监测与控制。

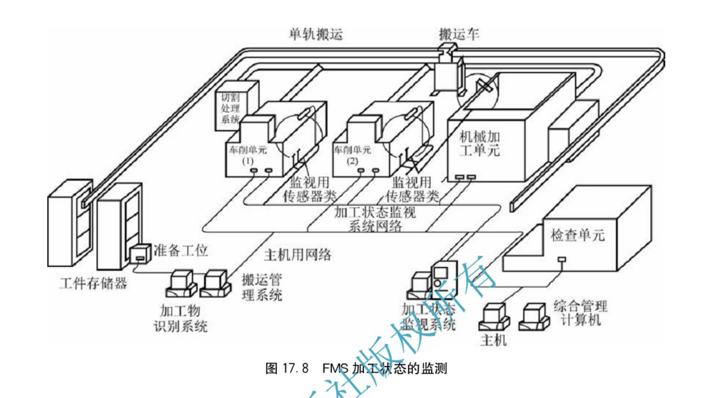


图 17.8 FMS 加工状态的监测

17.6 计算机集成制造系统

计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System，CIMS)是一种基于CIM 哲理的组织、管理、运行企业的现代制造系统。CIM 的概念是 1974 年由美国人约瑟夫·哈林顿博士提出的，其基本出发点有两个：(1)大制造观念，应统一考虑全过程；(2)整个生产过程是信息的采集、传递和加工的过程，最终产品是信息的物质表现。

CIMS 是通过计算机硬软件，并综合运用现代管理技术、制造技术、信息技术、自动化技术、系统工程技术，将企业生产全部过程中有关的人、技术、经营管理三要素及其信息与物流有机集成并优化运行的复杂的大系统。作为制造自动化技术的最新发展、工业自动化的革命性成果，CIMS 代表了当今工厂综合自动化的最高水平，被誉为是未来的工厂。

CIMS 是自动化程度不同的多个子系统的集成，如管理信息系统(MIS)、制造资源计划系统(MRPII)、计算机辅助设计系统(CAD)、计算机辅助工艺设计系统(CAPP)、计算机辅助制造系统(CAM)、柔性制造系统(FMS)，以及数控机床(NC，CNC)、机器人等。CIMS 正是在这些自动化系统的基础之上发展起来的，它根据企业的需求和经济实力，把各种自动化系统通过计算机实现信息集成和功能集成。

从功能上看，CIMS 包括了一个制造企业中设计、制造、经营管理和质量保证等主要功能，并运用信息集成技术和支撑环境使以上功能有效集成，如图 17.9 所示。

在 CIMS 中，实现了 CAD/CAPP/CAM 的集成(图 17.10)，CAD 输出的是零件的几何信息(图形、尺寸、公差等)和加工信息(材料、热处理、批量等)，CAD 是 CAPP 的输入，CAPP 是利用计算机来制定零件的工艺规程，其输入的是零件的信息，输出的是零件的工艺过程和工序内容，故 CAPP 属于设计范畴。CAM 输出的是刀位文件和数控加工程序。刀位文件表示了刀具的运动轨迹，与夹具、工件在一起可进行加工仿真以防运动干涉，同时又是

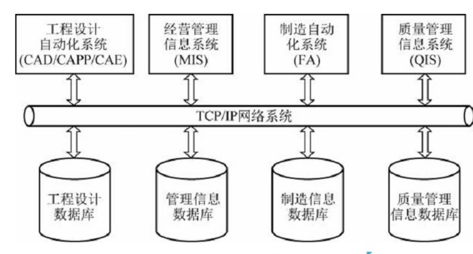


图 17.9　CIMS 的组成

编制数控程序的根据，刀位文件通过后置处理便可获得机床的数控加工程序。



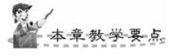
图 17.10　CAD/CAPP/CAM 的系统集成

在当前全球经济环境下，CIMS 被赋予了新的含义，即现代集成制造系统(Contemporary Integrated Manufacturing System)。将信息技术、现代管理技术和制造技术相结合，并应用于企业全生命周期各个阶段，通过信息集成，过程优化及资源优化，实现物流、信息流、价值流的集成和优化运行，达到人(组织及管理)、经营和技术三要素的集成，以加强企业新产品开发的 T、Q、C、S、E，从而提高企业的市场应变能力和竞争力。

思考及实践

1. 到学校或企业的测量实验室，参观三坐标测量机和三维激光扫描仪等测量设备。
2. 工业机器人一般由哪些部分构成的?
3. 在汽车制造中，工业机器人有哪些用途?
4. 阐述 CAD、CAE、CAPP 和 CAM 的含义。
5. FMS 和 CIMS 产生的技术和市场背景是怎样的?
6. 以 FMS 和 CIMS 制造模式发展无人工厂，是否可行?

第 18 章 汽车制造



知识要点	掌握程度	相关知识
汽车构造	掌握汽车的总体构造； 了解发动机、变速器、离合器、驱动桥等部件的作用	汽车的四大基本组成部分； 汽车底盘的传动系、行驶系、转向系和制动系的功能和组成； 发动机、车身、汽车电器的基本构造或组成
汽车制造过程	了解广义汽车制造的全生命周期过程； 掌握汽车工厂生产的五大工艺过程	汽车制造的全生命周期从市场调查开始，直到报废回收； 汽车的工厂生产包括冲压、焊接、涂装、总装、检验等五大工艺过程
汽车的生产模式及发展	了解汽车及其制造模式的发展历程； 了解福特和丰田两种生产模式的核心思想	福特汽车生产模式； 丰田汽车生产模式

汽车(automobile)，英文原译为“自动车”，是指由动力驱动，具有四个或四个以上车轮的非轨道承载的车辆，主要用于载运人员和(或)货物、牵引载运人员和(或)货物及其他特殊用途。汽车主要分为乘用车和商用车，如图 18.1 所示。

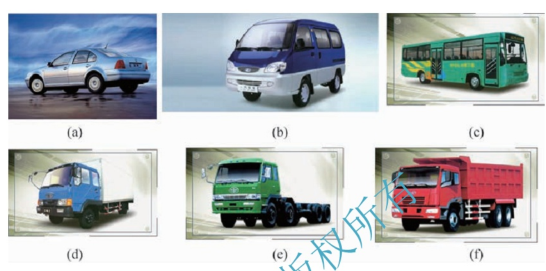


图 18.1　各种汽车

汽车制造过程中要用到钢铁、玻璃、橡胶、塑料等各种材料，要用到切削、冲压、铸造、锻造、注塑、密炼等制造工艺。汽车产业可以说是集合了各个领域的技术，形成一座庞大的产业山脉，能有效地拉动经济发展，同时，又为生活带来了便利。

汽车产生的 120 多年来，它已经改变了我们的生活，它在带给我们极大便利的同时，的确也带来了一些烦恼。但是，生活就是这样，对任何生活方式的评价都是相对的，没有绝对的好与坏。这是一种观念，一种态度，更是一种文化。

18.1　汽车构造

汽车一般由发动机、底盘、车身和电器设备等四个基本部分组成，其总成拆分平面图如图 18.2 所示。

发动机为汽车的运行提供动力，由缸体、缸盖、活塞、连杆、曲轴及配气、燃料供给、润滑、冷却等系统组成，如图 18.3 所示。发动机相当于汽车的心脏，是一切动力的来源。

当发动机输出动力之后，相应的机构会接收，使汽车产生运动，并保证汽车按照驾驶员的操控行驶，这一切都要靠底盘来运行。底盘还支承、安装汽车发动机及其各部件、总成，形成汽车的整体造型。底盘包括传动系(离合器、变速箱、万向传动装置以及驱动桥)、行驶系(车架、车轮等)、转向系(转向盘、转向蜗杆等)和制动系(油泵或气泵、刹车片等)等四个部分。

离合器的作用是使发动机的动力与传动装置平稳地接合或暂时地分离，以便于驾驶员进行汽车的起步、停车、换挡等操作。变速器用于汽车变速、变输出扭矩。变速器常见的种类有手动和自动两大类(图 18.4)。为了实现一些轴线相交或相对位置经常变化的转轴之间的动力传递，例如在变速器与驱动桥之间、变速器与分动器之间、分动器与驱动桥之间

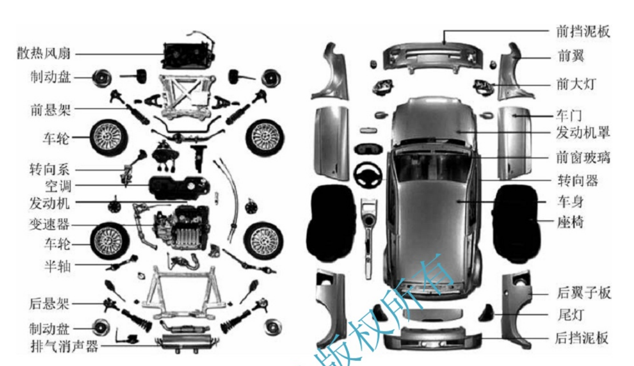


图 18.2 汽车总成拆分平面图



图 18.3 汽车发动机



(a) 手动变速器　　(b) 自动变速器

图 18.4 手动和自动变速器

以及驱动桥与驱动轮之间，必须采用万向传动装置。万向传动装置一般由万向节和传动轴组成，有时还要有中间支承，如图 18.5 所示。驱动桥其主要功用是将万向传动装置传来的发动机动力经过主减速器的减速增距，改变转矩的传递方向，通过差速器使内外侧车轮以不同转速转动，还有就是通过桥壳和车轮实现车身的承载。

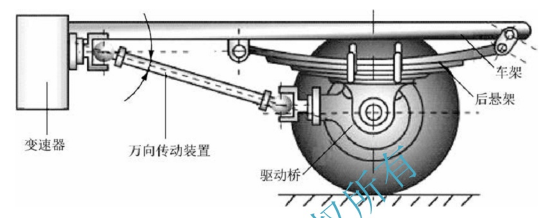


图 18.5　万向传动装置

行驶系由车架、车桥、悬挂和车轮等部分组成，基本功用是支承全车重量并保证汽车的行驶。车桥通过悬挂与车架连接，支承着汽车大部分重量，并将车轮的牵引力或制动力，以及侧向力经悬架传给车架。按使用功能划分，车桥又可分为转向桥、转向驱动桥、驱动桥和支承桥。如图 18.6 所示为汽车的驱动桥和悬挂。



图 18.6　驱动桥和悬挂

汽车转向系统是用来改变汽车行驶方向的专设机构和总称。转向系统包括转向操控机构、转向器、转向传动部分三部分，如图 18.7 所示。汽车转向系统的功用是保证汽车能按照驾驶员的意愿进行直线或转向行驶。按转向能源的不同，转向系统可分为机械转向系统和动力转向系统两大类。

汽车上用以使外界在汽车某些部分施加一定的力，从而进行一定程度制动的一系列专门装置统称为制动系统。其作用是：使行驶中的汽车按照驾驶员的要求进行强制减速甚至停车；使已停止的汽车在各种道路条件下(包括在坡道上)稳定驻车；使下坡行驶的汽车速度保持稳定。制动系统可分为行车制动系统、驻车制动系统、应急制动系统及辅助制动系

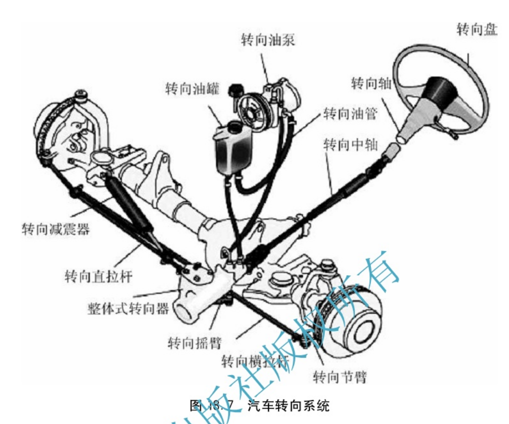


图 18.7 汽车转向系统

统等。上述各制动系统中，行车制动系统和驻车制动系统是每一辆汽车都必须具备的。常见的盘式制动器如图 18.8 所示。



图 18.8 盘式制动器

车身指的是车辆用来载人装货的部分，也指车辆整体，如图 18.9 所示。有的车辆的车身既是驾驶员的工作场所，又是容纳乘客和货物的场所。车身包括车窗、车门、驾驶舱、乘客舱、发动机舱和行李舱等。车身的造型有厢形、鱼形、船形、流线形及楔形等几种，结构形式分单厢、两厢和三厢等类型。车身造型结构是车辆的形体语言，其设计好坏将直接影响到车辆的性能。车身附件有门锁、门铰链、玻璃升降器、各种密封件、风窗刮水器、风窗洗涤器、遮阳板、后视镜、拉手、点烟器、烟灰盒等。

汽车电器设备包括电源、起动、点火、照明、信号、控制等电子装置。按照对汽车行驶性能作用的影响划分，可以把汽车电气产品归纳为两类：一类是汽车电子控制装置，



图 18.9　车身

汽车电子控制装置要和车上机械系统进行配合使用，即所谓“机电结合”的汽车电子装置；它们包括发动机、底盘、车身电子控制。例如电子燃油喷射系统、制动防抱死控制、防滑控制、牵引力控制、电子控制悬架、电子控制自动变速器、电子动力转向等，另一类是车载汽车电子装置，车载汽车电子装置是在汽车环境下能够独立使用的电子装置，它和汽车本身的性能并无直接关系。它们包括汽车信息系统(行车电脑)、导航系统、汽车音响及电视娱乐系统、车载通信系统、上网设备等。汽车电子化被认为是汽车技术发展进程中的一次革命，汽车电子化的程度被看作是衡量现代汽车水平的重要标志，是用来开发新车型，改进汽车性能最重要的技术措施。

18.2　汽车制造过程

广义的汽车制造过程不仅是汽车的工程生产过程，而是从市场调查开始，到制造、售后服务和报废回收的全生命周期过程。

1. 调查、策划、设计

这是制造汽车的第一步。(1)从各个方面调查人们需要什么样的汽车。(2)在调查的基础上，制订计划，看做成什么样的汽车为好。(3)通过这一步，让头脑中描绘的汽车具有实际形状。画出草图，制作模型，确定设计，并利用计算机对结构、零部件进行设计。汽车从制订计划到实际生产，大约需要 2 至 4 年时间。

2. 试制、测试

根据设计，试制样车。样车也叫做测试车，样车要接受多达数百项的测试。通过反复的试制和测试(图 18.10)，对样车进行改进，做成更为完美的成品。通过全部测试之后，就可以在工厂生产了。

3. 工厂生产

汽车的车身和发动机等主要零部件在汽车工厂进行生产，其他零部件在关联工厂进行生产。将所有零部件集中到汽车工厂后，进行组装制造整车。组装作业在流水线上依次进行，1 辆车大约需要 15 到 20 分钟的时间即可组装完毕，当然不同种类的汽车组装时间有



(a) 在测试跑道上进行"高速行驶测试"



(b) 检查车身强度的"碰撞测试"

图 18.10 汽车测试

所不同。汽车工厂生产分为 5 道程序，分别为冲压，焊接，涂装，总装，检验，如图 18.11 和图 18.12 所示。

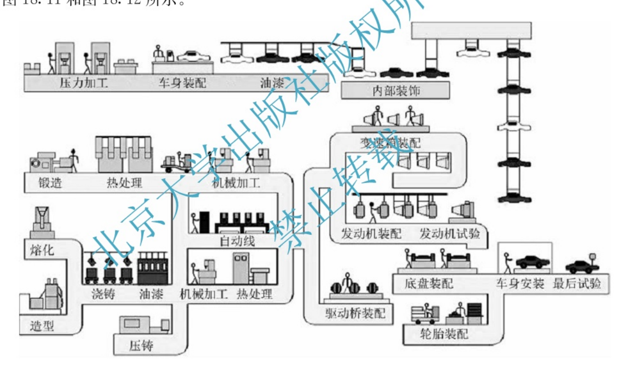


图 18.11 汽车的工厂生产过程



(a) 涂装

(b) 总装

图 18.12 汽车的涂装和总装

这是一组汽车生产厂的流水线，从图 18.12 中可以看出，现代汽车生产的自动化水平是相当高的，人工操作是很少的，主要是由运输带和机械臂完成各种工作。

4. 运输、销售

检验合格的汽车用挂车运到附近港口装船，或通过其他途径运输再运到全国各地的经销店和世界各国。

5. 售后服务和报废回收

18.3 汽车生产模式及发展

卡尔·本茨(Karl Friedrich Benz)是德国著名的戴姆勒—奔驰汽车公司的创始人之一，人称“汽车之父”、“汽车鼻祖”。1885 年，世界上第一辆三轮车正是由卡尔·本茨制造，并于 1886 年 1 月 29 日申请并获得了发明专利，所以，1886 年 1 月 29 日被认为汽车的诞生日。几乎同时，德国工程师戈特利布·戴姆勒也成功研制成一辆公认的以内燃机为动力的四轮汽车。

德国发明了汽车，美国则把这个行业带入了艺术设计的圣殿，而哈利·厄尔(Harley Earl，1893—1969)则是有史以来最伟大汽车设计大师，对现代汽车的影响不可估量。厄尔发明了概念车，创立了使用陶模设计汽车形状。自他开始，车展上开始有吸引目光的百老汇歌舞表演，有重铬设计的梦幻车。厄尔领导设计团队创造了流线型空气动力现代车型，其中包括 1947 年的凯迪拉克 sedanet(图 18.13)、1953 年的雪佛兰 corvette 科尔维特和其他几款经典美国车型。



图 18.13 1947 年的凯迪拉克 sedanet

汽车的主要技术性能是指汽车在使用中所表现的性能，主要有动力性、燃油经济性、制动性、操纵稳定性、环保性、行驶的平顺性以及通过性。现代汽车还要求有造型优美的外形，车内设施具有人性化的设计和优雅的环境。汽车生产制造模式的发展，首先要保证汽车综合技术性能的竞争力，否则就没有生存的空间。

汽车制造模式的变化，经历了从手工作坊到大批量生产，再到精良生产的发展历程。在汽车工业的初期，手工装配一部汽车需要一天的时间，那时候，汽车是一种权势和富贵的象征。如今，丰田的自动化生产线一天能装配 1000 台汽车，而且质量和价格也很有竞争力。生产效率的飞跃，归功于自动化的生产技术和生产模式的发展。正是制造模式的变革，将汽车送进了千家万户。

制造模式变革的推动力是市场的需求和技术的发展。一方面，随着经济的发展和人们生活水平的不断提高，在对汽车的质量要求更高的同时，也提出了个性化、多样化的需求；另一方面，随着数控机床、工业机器人和计算机等技术和设备的广泛使用，提高了制造过程的柔性和自动化水平。

1. 福特汽车生产模式

19世纪初，美国作为一个工业国，快速地发展起来，劳动者的收入水平也由此得到提高。福特认为，汽车价格如果下降的话，会出现很大一批消费者。这就是福特模式的思考起点。如何降低汽车的价格呢？福特公司建立的完善的汽车装配流水线(图18.14)，把传统的单件生产方式转变成了高效的大批量生产方式，其核心是“互换性”和“简化”两大思想：

(1) 互换：要求所有同一类型汽车零件，不论何时何地生产的，始终如一，都可以互换，都能方便地装到任何一辆车上，都能起到同样的作用；

(2) 简化：其原则是把复杂的最终产品分解成简单件到零件，把装配操作标准化、程序化，成为技术水平不高的工人都能完成的简单动作，并且将整个生产流程组织成一个紧张、高效、有节奏的流水生产线，人在这里变成了“会说话的机器”。

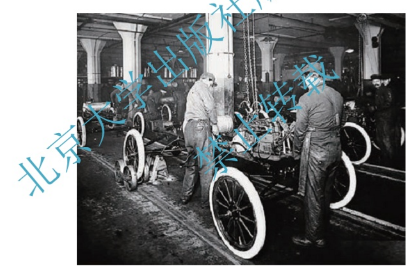


图18.14 福特推出的汽车装配线(1913年)

正是这种生产模式的变化，大大降低了汽车的价格，人们可以用不到1/3的价钱买到比单件生产质量高得多的汽车。福特汽车生产模式的优势是“大批量”，就是用流水线重复生产同一种产品，然而这种生产模式也有它的弊端，就是无法快速应对市场需求的变化，产品种类的局限性也很强。

2. 丰田汽车生产模式

20世纪50年代，日本丰田公司首创了一种新的生产方式。就是适时适量的制造，通过持续不断的改进，消除生产过程中的一切浪费，达到质量零缺陷，产品零库存的目标，又叫精良生产。

丰田汽车生产模式的内涵包括：以最少的投入来获得成本低、质量高、产品投放市场快、用户满意为目标的一种生产方式；以人为本，以简化为手段，以尽善尽美为最终目标，使人员、设备大为减少，产品开发周期大为缩短，而生产出的产品品种更多、质量更

好，如图 18.15 所示；主张并力求消除一切非生产的费用，而且能生产出更好更多地满足用户各种需求的变型产品。

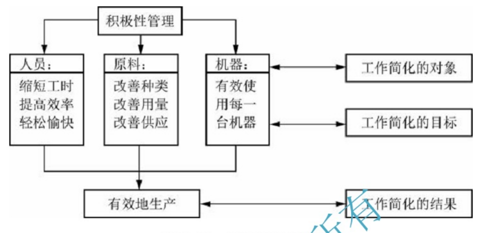


图 18.15　工作简化示意图

21 世纪的汽车将向轻量化、安全化和智能化的方向发展。轻量化是指汽车在满足使用性能的前提下，质量轻、布置紧凑、车内面积利用率高，整车体小的量化指标，未来减重，在用材上采用铝镁合金、工程塑料、新型复合材料等轻质材料，在结构设计上采用最优化设计进行减重。而智能化是现代汽车最具有生命力和最具市场潜力的发展趋势，主要体现在汽车的自动控制能力、自动操纵能力和信息化程度等方面。比如汽车上的 GPS 系统，能够通过全球卫星定位，确定汽车当前所处的位置，离目的地的距离、最佳的行车路线，还可以预知沿途的酒店、加油站等信息。驾驶员分神监视系统能够监视驾驶员打瞌睡、醉酒等信息，并发出警示。智能防碰撞系统可以实现自动减速、制动汽车甚至转向，防止碰撞的发生。还有智能轮胎、智能安全气囊、智能空调等。

未来的汽车会是什么样子？同学们，请你大胆地发挥想象力，来憧憬一下。

思考及实践

1. 你会开车吗？通过观察和驾驶，感受一下汽车的构成和各部分的功能。

2. 汽车制造过程有哪些基本的步骤？

3. 有机会到附近的汽车 4S 店去参观，请导购人员介绍一下你感兴趣车型的配置，重点了解一下发动机和底盘的制造技术特点。

4. 回顾一下前面学过的各种制造工艺，举例说明汽车上各种零件分别用到的制造方法。

5. 福特汽车生产模式和丰田汽车生产模式有什么不同？

6. 学完这门课程，你认为对你未来购买汽车增加了哪些知识？